



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**REALIZACE VYSOKORYCHLOSTNÍHO PŘENOSOVÉHO
KANÁLU S VYUŽITÍM POLARIZAČNÍCH ROVIN ŠÍŘENÍ
SVĚTLA**

TRANSMISSION BROADBAND CHANNEL IMPLEMENTATION USING LIGHT PROPAGATION
POLARIZATION AXES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Mafka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

BRNO 2017



Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Telekomunikační a informační technika**

Ústav telekomunikací

Student: Bc. Martin Mafka

ID: 154795

Ročník: 2

Akademický rok: 2016/17

NÁZEV TÉMATU:

Realizace vysokorychlostního přenosového kanálu s využitím polarizačních rovin šíření světla

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Úkolem diplomové práce je analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli. Práce se zabývá možnostmi použití obou polarizačních rovin jako samostatných přenosových kanálů a zahrnuje optimalizaci známých uspořádání pokusného pracoviště a jejich realizaci pro různé typy optických tras. Cílem práce je realizace funkčního polarizačního multiplexu pro vlnovou délku 1550 nm.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] COLLETT, E. Field Guide to Polarization, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN: 9780819458681

[2] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku, Brno, CENTA 2009 ISBN: 9788086785141

[3] COLLETT, E. Polarized Light in fiber optics, SPIE, New Jersey 2003, ISBN: 9780819457615

Termín zadání: 1.2.2017

Termín odevzdání: 24.5.2017

Vedoucí práce: prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

Konzultant:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá analýzou způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami. Teoretická část je zaměřena na problematiku polarizovaného světla, jeho matematickému popisu pomocí Stokesových a Jonesových vektroř, zobrazení stavu polarizace na Poincarého kouli a polarizačnímu multiplexu. V praktické části je nejdřívě proměřeno několik laboratorních měření k ověření teoretických předpokladů z předešlých kapitol. V závěru práce bylo sestaveno funkční pracoviště polarizačního multiplexu pro vlnovou délku 1550 nm.

KLÍČOVÁ SLOVA

Polarizace, Stokesovy vektory, Jonesovy vektory, Poincarého koule, PM vlákna, Dvojlom, Polarizační multiplex

ABSTRACT

The aim of this master's thesis is to analyze ways of propagation light in optical fiber with two polarization planes. Theoretical part is focused to to the issue of polarized light, its mathematical description using Stokes and Jones vectors, the state of polarization on Poincare sphere and polarization multiplex. In the practice part are first measured several laboratory measurements to verify the theoretical assumptions from the previous chapters. At the end of the thesis was constructed a functional polarization multiplex for wavelength 1550 nm.

KEYWORDS

Polarization, Stokes vectors, Jones vectors, Poincaré sphere, PM fibers, Birefringence, Polarization multiplex

MAFKA, Martin *Realizace vysokorychlostního přenosového kanálu s využitím polarizačních rovin šíření světla*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2017. 106 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Realizace vysokorychlostního přenosového kanálu s využitím polarizačních rovin šíření světla“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

PODĚKOVÁNÍ

Nejprve bych rád poděkoval vedoucímu práce panu prof. Ing. Miloslavu Filkovi, CSc.

Dále bych velice rád poděkoval panu Ing. Martinovi Kyselákovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost, ochotu a podnětné návrhy při řešení diplomové práce.

Na konec bych chtěl poděkoval mé rodině za podporu a trpělivost, kterou se mnou měli v průběhu celého studia.

Brno

.....

podpis autora(-ky)

OBSAH

Úvod	15
1 Polarizace	16
1.1 Polarizace světla	16
1.2 Eliptická polarizace	17
1.3 Kruhová polarizace	18
1.4 Lineární polarizace	19
1.4.1 Polarizace světla odrazem	19
1.4.2 Polarizace světla lomem	20
1.4.3 Polarizace světla dvojlomem	21
1.4.4 Polarizace pomocí polarizačního filtru	22
2 Matematický popis polarizace	24
2.1 Stokesův popis	24
2.1.1 Mullerovy matice	26
2.2 Jonesův popis	28
2.3 Poincarého koule	29
2.4 Vztah mezi Stokesovým a Jonesovým popisem	31
2.4.1 Vztah mezi Jonesovy maticemi a Mullerovy maticemi	31
3 Přenos signálu v optických systémech	33
3.1 Typy PM vláken	35
3.2 Polarizační multiplex	36
3.2.1 Polarizační dělič	37
3.2.2 Polarizační kontrolér	38
4 Využití polarizačního multiplexu	40
4.1 Použití polarizačního multiplexu a jeho řešení	40
5 Zapojení polarizačního multiplexu	43
5.1 Zapojení pracoviště s PM vláknem	43
5.2 Zapojení pracoviště s SM vláknem	46
5.2.1 Dvojlom v jednojádrových vláknech	47
5.3 Kombinace polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem	50
6 Praktická realizace polarizačního multiplexu	52
6.1 Měření pracoviště s laserovou diodou jako vysílač	53
6.1.1 Laserová dioda připojena na TX1	55

6.1.2	Laserová dioda připojena na TX2	55
6.1.3	Laserová dioda připojena na TX1 s vloženým jednovidovým vláknem	56
6.1.4	Laserová dioda připojena na TX2 s vloženým jednovidovým vláknem	57
6.2	Měření pracoviště s média konvertory	58
6.2.1	Zapojení s média konvertory	58
6.2.2	Zapojení s média konvertory a vloženým jednovidovým vláknem	59
6.2.3	Funkční pracoviště polarizačního multiplexu pro vlnovou délku 1550 nm	61
6.3	Měření bitové chybovosti	63
7	Závěr	67
	Literatura	69
	Seznam symbolů, veličin a zkratk	71
	Seznam příloh	73
A	Ověření matematických vzorců	74
A.1	Převod mezi Stokesovým a Jonesovým vektorem	74
A.2	Změna stavu polarizace za pomoci vlnové destičky	75
B	Stavy polarizace zobrazeny na Poincarého kouli	76
B.1	Stavy polarizace pro LD připojenou na TX1	76
B.2	Stavy polarizace pro LD připojenou na TX2	77
B.3	Stavy polarizace pro LD připojenou na TX1 a s vloženým SM vláknem	79
B.4	Stavy polarizace pro LD připojenou na TX2 a s vloženým SM vláknem	80
B.5	Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory	82
B.6	Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem	84
B.7	Změna Stavů polarizace v SM vlákne	85
B.8	Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem	86
B.9	Stav polarizace za SM vláknem u funkčního pracoviště	89
C	Parametry použitých komponentů	91
C.1	Laserová dioda LPS-PM1550-FC	91
C.2	Lineární polarizátor ILP1550PM-FC	92
C.3	Polarimetr PAX5710IR3	93

C.4	Média konvertor TP-LINK MC220L	94
C.5	SFP modul TP-LINK TL-SM321	95
C.6	Polarizační PM splitter/combiner PBC1550PM-FC	96
C.7	Patchcord optický SM LC-FC	97
C.8	Jednovidový optický kabel Cozlink	98
C.9	Patchcord optický SM E2000-FC	99
C.10	Polarizační kontrolér FPC561	100
C.11	Dělič optického výkonu PMC1550P-90B-FC	101
C.12	Analyzátor výkonnosti komunikace HP 37717C	102
D	Fotografie pracoviště	103
E	OBSAH DVD	106

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Šíření elektromagnetické vlny.	16
1.2	Polarizační elipsa.	18
1.3	Stavy kruhové polarizace.	18
1.4	Stavy lineární polarizace.	19
1.5	Polarizace odrazem a) obecný úhel b) Brewsterův úhel.	20
1.6	Polarizace lomem a odrazem.	20
1.7	Nikolův hranol [3].	22
1.8	Průchod nepolarizovaného světla polarizačním filtrem [5].	23
2.1	Průchod paprsku přes a) jedno optické zařízení b) více optickými zařízeními.	27
2.2	Poincarého koule.	29
2.3	Poincarého koule se zobrazením polarizačních stavů vlny.	30
3.1	Diferenciální skupinové spoždění ovlivněné dvojlomem optického vlákna.	33
3.2	Stav polarizace ovlivněn dvojlomem při průchodu optickým vláknem [13].	34
3.3	PM vlákna: a) Panda b) Motýlek c) Eliptické.	35
3.4	Průřez PM vlákna typu Panda [14].	35
3.5	Princip polarizačního multiplexu.	36
3.6	Princip polarizačního děliče.	37
3.7	Polarizační dělič (Combiner/Splitter).	38
3.8	Polarizační kontrolér (PC).	38
3.9	Polarizační kontrolér používající Babinetův-Soleilův kompenzátorový princip.	39
4.1	Koncepční schéma navrženého demultiplexoru s využitím automatic- kého systému zpětné vazby [18].	40
4.2	Schéma měření – polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu [15].	42
5.1	Stav polarizace: a) LVP b) LHP.	43
5.2	Pravotočivě kruhová polarizace [19].	44
5.3	Zapojení pracoviště s využíváním dvou polarizačních rovin jako ne- závislých signálů s PM vláknem.	44
5.4	Zapojení pracoviště s využíváním dvou polarizačních rovin jako ne- závislých signálů s SM vláknem.	46
5.5	Změna polarizace způsobená při průchodu jednovidovým optickým vláknem [20].	46
5.6	$b + (V/2)(dv/dV)$ jako funkce V [20].	48
5.7	Průřez eliptickým jádrem optického vlákna.	48

5.8	Ohyb na vlákne.	49
5.9	Blokové schéma polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem va- rianta 1.	51
5.10	Blokové schéma polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem va- rianta 2.	51
6.1	Blokové schéma zapojení pracoviště.	52
6.2	Blokové schéma zapojení pracoviště s vloženým jednovidovým vláknem.	52
6.3	Signál LD zobrazený na Poincarého kouli.	54
6.4	Signál LD zobrazený v režimu rozsahu.	54
6.5	Signál z LD a lineárního polarizátoru zobrazený na Poincarého kouli.	54
6.6	Blokové schéma zapojení pracoviště s vloženým jednovidovým vláknem a polarizačním kontrolérem.	60
6.7	Ověření funkčnosti pracoviště pomocí příkazu ping v příkazovém řádku.	62
6.8	Měření rychlosti stahování a nahrávání u funkčního pracoviště.	62
6.9	Blokové schéma zapojení pracoviště s analyzátozem výkonnosti komunikace.	63
6.10	Nastavení vysílače na analyzátozu výkonnosti komunikace.	64
6.11	Stav polarizace na Poincarého kouli při vychýlení první fázové destičky polarizačního kontroléru do chybovosti.	65
6.12	Chybovost BER zobrazená na analyzátozu výkonnosti komunikace při první fázové destičky polarizačního kontroléru.	65
B.1	Stav polarizace v bodě 1 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1.	76
B.2	Stav polarizace v bodě 3 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1.	76
B.3	Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1.	77
B.4	Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1.	77
B.5	Stav polarizace v bodě 2 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2.	77
B.6	Stav polarizace v bodě 3 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2.	78
B.7	Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2.	78
B.8	Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2.	78
B.9	Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1 se zapojeným SM vláknem.	79
B.10	Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1 se zapojeným SM vláknem.	79
B.11	Stav polarizace v bodě 6 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1 se zapojeným SM vláknem.	80
B.12	Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2 se zapojeným SM vláknem.	80
B.13	Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2 se zapojeným SM vláknem.	81

B.14 Stav polarizace v bodě 6 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2 se zapojeným SM vláknem.	81
B.15 Stav polarizace v bodě 1 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.	82
B.16 Stav polarizace v bodě 2 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.	82
B.17 Stav polarizace v bodě 3 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.	83
B.18 Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.	83
B.19 Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.	83
B.20 Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem.	84
B.21 Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem.	84
B.22 Stav polarizace v bodě 6 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem.	85
B.23 Stav polarizace před SM vláknem zobrazen na Poincarého kouli. . . .	85
B.24 Stav polarizace za SM vláknem (1 m) zobrazen na Poincarého kouli. .	85
B.25 Stav polarizace v bodě 1 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.	86
B.26 Stav polarizace v bodě 2 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.	86
B.27 Stav polarizace v bodě 3 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.	87
B.28 Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.	87
B.29 Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.	87
B.30 Stav polarizace v bodě 6 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.	88
B.31 Stav polarizace v bodě 7 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.	88
B.32 Stav polarizace za SM vláknem (1 m) zobrazen na Poincarého kouli u funkčního pracoviště.	89
B.33 Stav polarizace za SM vláknem (10 m) zobrazen na Poincarého kouli u funkčního pracoviště.	89

B.34 Stav polarizace za SM vláknem (2000 m) zobrazen na Poincarého kouli u funkčního pracoviště.	90
B.35 Stav polarizace 2 za SM vláknem (2000 m) zobrazen na Poincarého kouli u funkčního pracoviště.	90
C.1 LPS-PM1550-FC	91
C.2 ILP1550PM-FC	92
C.3 PAX5710IR3	93
C.4 TP-LINK MC220L	94
C.5 TP-LINK TL-SM321	95
C.6 PBC1550PM-FC	96
C.7 OPA-9-FC/LC-1D-AMP	97
C.8 CPP-FC-P-FC-P-SS-GD-PVC	98
C.9 E2AFC-9-S20-YW-2M0	99
C.10 FPC561	100
C.11 PMC1550-90B-FC	101
C.12 Hewlett Packard 37717C	102
D.1 Fotografie zapojení celého pracoviště.	103
D.2 Fotografie zobrazující nastavení polarizace v SM patchcord kabelu. . .	104
D.3 Detailní fotografie zapojení pracoviště.	104
D.4 Fotografie pracoviště při měření chybovosti.	105

SEZNAM TABULEK

2.1	Přehled Stokesových a Jonesových vektorů.	32
3.1	Stav polarizace signálu v jednotlivých bodech polarizačního multiplexu.	37
5.1	Stav polarizace signálu v jednotlivých bodech pracoviště s PM vláknem.	45
6.1	Kalibrace Polarimetru.	53
6.2	Použité přístroje pro kalibraci.	55
6.3	Měření zapojení s LD připojenou na TX1.	55
6.4	Měření zapojení s LD připojenou na TX2.	56
6.5	Měření zapojení s jednovidovým vláknem pro LD připojenou na TX1.	56
6.6	Měření zapojení s jednovidovým vláknem pro LD připojenou na TX2.	57
6.7	Použité přístroje při měření pracoviště s LD.	57
6.8	Použité přístroje při měření pracoviště s média konvertory.	58
6.9	Měření zapojení s média konvertory.	59
6.10	Měření zapojení s jednovidovým vláknem pro média konvertory.	59
6.11	Změna stavu polarizace po průchodu jednovidového optického kabelu 1 m.	60
6.12	Měření zapojení s jednovidovým vláknem a polarizačním kontrolérem pro média konvertory.	60
6.13	Stav polarizace na konci SM vlákna různé délky.	61
6.14	Použité přístroje u funkčního pracoviště polarizačního multiplexu.	63
6.15	Stokesovi vektory a BER při manipulaci s polarizačním kontrolérem.	65
6.16	Použité přístroje při měření bitové chybovosti.	66
C.1	Parametry pro Laserovou diodu LPS-PM1550-FC (katalog. listy Thor- labs [14]).	91
C.2	Parametry pro lineární polarizátor ILP1550PM-FC (katalog. listy Thorlabs [14]).	92
C.3	Parametry pro polarimetr PAX5710IR3 (katalog. listy Thorlabs [14]).	93
C.4	Parametry média konvertoru TP-LINK MC220L (katalog. listy tp- link [22]).	94
C.5	Parametry SFP modulu TP-LINK TL-SM321 (katalog. listy tp-link [22]).	95
C.6	Parametry polarizačního PM splitter/combiner PBC1550PM-FC (ka- talog. listy Thorlabs [14]).	96
C.7	Parametry propojovacího kabelu OPA-9-FC/LC-1D-AMP (katalog. listy Cozlink [23]).	97
C.8	Parametry jednovidového optického kabelu CPP-FC-P-FC-P-SS-GD- PVC (katalog. listy Cozlink [23]).	98

C.9	Parametry jednovidového optického kabelu E2AFC-9-S20-YW-2M0 (katalog. listy Cozlink [23]).	99
C.10	Parametry polarizačního kontroléru FPC561 (katalog. listy Thorlabs [14]).	100
C.11	Parametry optického děliče výkonu PMC1550P-90B-FC (katalog. listy Thorlabs [14]).	101
C.12	Parametry Analyzátoru výkonnosti komunikace HP 37717C (katalog. listy Keysight technologies [24]).	102

ÚVOD

Optické sítě jsou v dnešní době velice oblíbené a to díky jejich malému útlumu a možnosti velkých přenosových rychlostí, až 10 Gbit/s. Mezi hlavní parametry limitující optické sítě je vložený útlum a disperze. Výstavba nových optických sítí není však nic levného a tak se stávající sítě musí využívat co nejefektivněji. Z nejperspektivnějších metod využití sítí co nejefektivněji se v poslední době jeví metoda využití dvou polarizačních rovin, kde se pomocí každé roviny přenáší odlišné data, tím docílíme až k zdvojnásobení využití stávajících sítí. Obdobná technologie se využívá v rádiových přenosech.

Tato diplomová práce se věnuje technologii polarizačního multiplexování, která patří mezi jednu z nejslibnějších technologií v optických sítích. Úkolem práce byla analýza způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsobu zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli. Cílem práce byla realizace funkčního pracoviště využívající technologii polarizačního multiplexu a to pro vlnovou délku 1550 nm.

Diplomová práce je rozdělena do několika částí. První kapitola se zabývá polarizací světla, jeho typy a způsoby, kterými lze získat lineárně polarizované světlo.

V druhé kapitole jsou probrány matematické popisy polarizace pomocí Stokesových a Jonesových vektorů. Dále je v kapitole popsán způsob zobrazení stavu polarizovaného světla za pomoci Poincarého kouli. Na závěr kapitoly jsou uvedeny matematické vztahy pro převod z Stokesových vektorů na Jonesovy a opačně.

Třetí kapitola popisuje speciální optická vlákna tzv. polarizaci zachovávající (PM), jenž umožňují šíření světla dvěma polarizačními rovinami v nepozměněné podobě po celé své délce. V kapitole je také popsán princip polarizačního multiplexu.

Využití polarizačního multiplexu se věnuje kapitola čtvrtá.

V další páté kapitole jsou probrány teoretické předpoklady pro funkční zapojení polarizačního multiplexu. Podrobněji se také věnuje dvojlomu v jednovídrových vláknech. Závěr kapitoly je věnován dvou možným typům kombinace polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem.

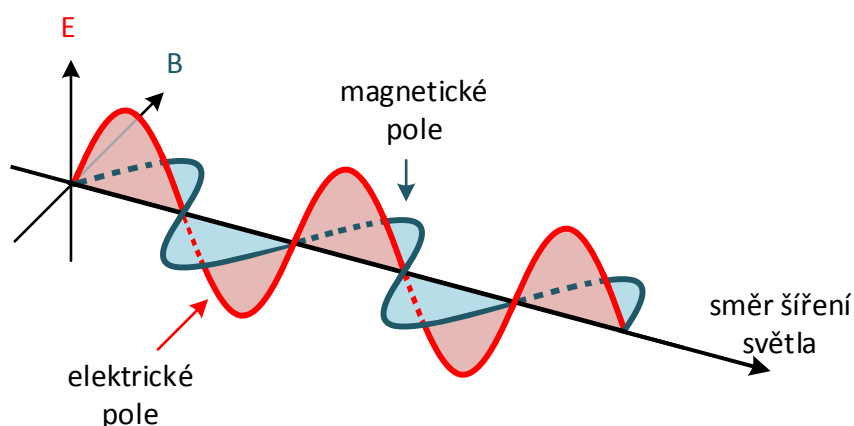
V poslední šesté kapitole bylo nejdříve proměřeno několik laboratorních měření k ověření teoretických předpokladů z předešlých kapitol. Na závěr bylo sestaveno funkční pracoviště polarizačního multiplexu pro vlnovou délku 1550 nm a změřena bitová chybovost pro zapojení s analyzátozem výkonnosti komunikace.

V závěru je práce stručně vyhodnocena.

1 POLARIZACE

1.1 Polarizace světla

Viditelné světlo je elektromagnetické vlnění o vlnové délce 390 nm až 750 nm, popsané pomocí dvou vektorů, vektorem elektrické intenzity \mathbf{E} a vektorem magnetické indukce \mathbf{B} . Vektor elektrické intenzity \mathbf{E} kmitá vždy kolmo na směr šíření vlnění. Vektor magnetické indukce \mathbf{B} je kolmý ke směru šíření vlnění a současně k vektoru elektrické intenzity \mathbf{E} . Oba vektory leží v rovině, jenž je kolmá ke směru šíření světla.



Obr. 1.1: Šíření elektromagnetické vlny.

Pokud se vektor \mathbf{E} šíří v dané rovině nahodilým směrem i velikostí, tak se jedná o nepolarizované světlo.

Polarizované světlo dostaneme při potlačení kmitání, nebo velikosti vektoru \mathbf{E} .

Rozepsáním vektoru intenzity elektrického pole \mathbf{E} do os x a y získáme rovnice:

$$E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x), \quad (1.1)$$

$$E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y), \quad (1.2)$$

kde E_{0x} a E_{0y} značí amplitudy, $\omega = 2\pi f$ je úhlová frekvence vlny, $k = 2\pi/\lambda$ zastupuje vlnové číslo a δ_x a δ_y jsou jejich počáteční fáze. Výraz $\omega t - kz$ je nazýván jako propagátor [1].

Polarizované světlo dělíme na:

- lineárně polarizované světlo,
- kruhově polarizované světlo a
- elipticky polarizované světlo.

Lineárně polarizované světlo získáme:

- odrazem světla,
- lomem světla,
- dvojlomem a
- pomocí polarizačního filtru (polaroidu).

1.2 Eliptická polarizace

Jde o nejobecnější druh monochromatického polarizovaného světla. Eliminací propagátoru $\omega t - kz$ a jejich počáteční fáze δ_x a δ_y nahradíme vzájemným fázovým rozdílem $\delta = \delta_y - \delta_x$ z rovnice 1.1 a 1.2 dostaneme rovnici elipsy [1]:

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_{0y}^2} - \frac{2E_x(z, t)^2 E_y(z, t)^2}{E_{0y} E_{0x}} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (1.3)$$

Polarizační elipsa je popsána pomocí dvou úhlových parametrů. Úhel orientační ψ mezi osou E_x a hlavní poloosou elipsy je definován vzorcem

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \cos \delta, \quad \psi \in \langle 0; \pi \rangle, \quad (1.4)$$

a eliptický úhel χ je definován

$$\tan 2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \sin \delta, \quad \chi \in \left\langle -\frac{\pi}{4}; \frac{\pi}{4} \right\rangle. \quad (1.5)$$

Přepsáním rovnic úhlových parametrů do trigonometrického tvaru získáme pomocný úhel α :

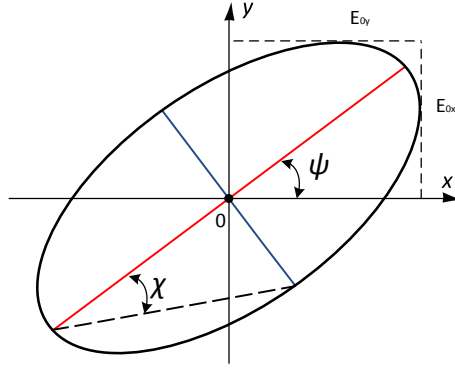
$$\tan \alpha = \frac{E_{0y}}{E_{0x}}, \quad \alpha \in \left\langle 0; \frac{\pi}{2} \right\rangle, \quad (1.6)$$

s jeho pomocí získáme trigonometrické vztahy:

$$\tan 2\psi = (\tan 2\alpha) \cos \delta, \quad \alpha \in \left\langle 0; \frac{\pi}{2} \right\rangle \cup \delta \in \langle 0; 2\pi \rangle, \quad (1.7)$$

$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta, \quad \alpha \in \left\langle 0; \frac{\pi}{2} \right\rangle \cup \delta \in \langle 0; 2\pi \rangle, \quad (1.8)$$

V důsledku konstantí amplitudy E_{0x} , E_{0y} a vzájemného fázového rozdílu δ zůstává polarizační elipsa neměnná po celé cestě průchodu paprsku [1].



Obr. 1.2: Polarizační elipsa.

Eliptická polarizace může být degenerována do několika speciálních tvarů pro různé hodnoty parametrů: E_{0x} , E_{0y} a δ . Zejména na: lineárně horizontální polarizované světlo (LHP), lineárně vertikální polarizované světlo (LVP) lineárně $\pm 45^\circ$ polarizované světlo (L+45P/L-45P) a kruhově pravotočivě nebo levotočivě polarizované světlo (RCP/LCP) [1].

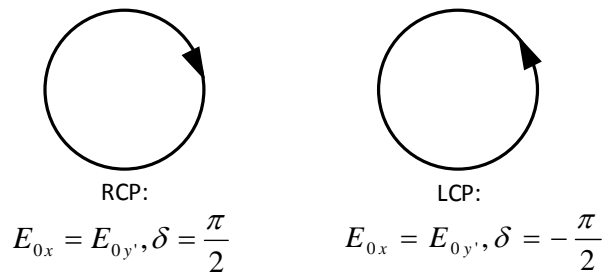
1.3 Kruhová polarizace

Kruhová polarizace je jeden ze speciálních stavů polarizace eliptické. Nastává při stavu, kdy jsou si obě amplitudy rovny $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ a vzájemný fázový rozdíl $\delta = \pm\pi/2$. Při splnění těchto podmínek dostáváme z rovnice 1.9 rovnici pro kruhově polarizované světlo, ve tvaru:

$$\frac{E_x(z, t)^2}{E_0^2} + \frac{E_y(z, t)^2}{E_0^2} = 1. \quad (1.9)$$

Kruhově polarizovaná vlna se rozděluje na dva typy:

- pravotočivou (RCP), kde $\delta = \pi/2$ a
- levotočivou (LCP), kde $\delta = -\pi/2$.



Obr. 1.3: Stavy kruhové polarizace.

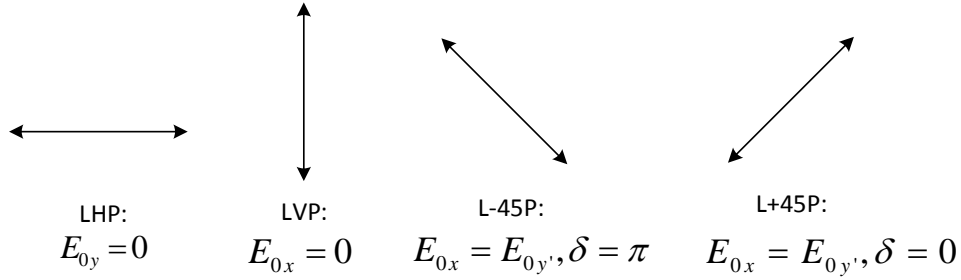
1.4 Lineární polarizace

Lineární polarizace je speciální stav polarizace eliptické, při které vektor elektrické intenzity kmitá pouze v jedné rovině. Nastává, když vzájemný fázový rozdíl $\delta = 0$ nebo $\delta = \pi$. Rozeznáváme dva typy:

- Fázový rozdíl $\delta = 0$. Jedná se o -45° polarizované světlo (L-45P).
- Fázový rozdíl $\delta = \pi$. Jedná se o $+45^\circ$ polarizované světlo (L+45P).

Dále lineární polarizace nastane, je-li jedna z amplitud E_{0x} nebo E_{0y} nulová, v takovém případě rozeznáváme dva typy:

- Amplituda $E_{0x} = 0$, tím vlna kmitá pouze ve směru osy y . Jedná se tedy o vertikálně polarizované světlo (LVP).
- Amplituda $E_{0y} = 0$, tím vlna kmitá pouze ve směru osy x . Jedná se tedy o horizontálně polarizované světlo (LHP).



Obr. 1.4: Stavy lineární polarizace.

1.4.1 Polarizace světla odrazem

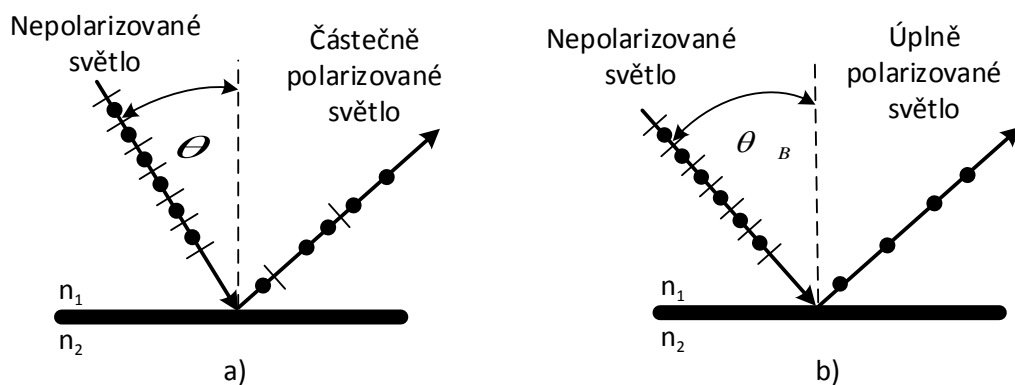
Při dopadu nepolarizovaného světla na rozhraní dvou prostředí dochází k jeho částečné polarizaci při odrazu. Úhel mezi dopadajícím paprskem a rovinnou zrcadla určuje stupeň polarizace. Paprsek bude úplně lineárně polarizován, pokud bude světlo dopadat pod tzv. Brewsterovým úhlem

$$\theta_B = \arctan \frac{n_2}{n_1}, \quad (1.10)$$

kde n_2 a n_1 jsou indexy lomu pro daná prostředí. Velikost Brewsterova úhlu závisí na indexu lomu rozhraní a tedy také na vlnové délce světla.

Například pro navázání světla z prostředí vzduch $n_1 = 1$ do prostředí korunové sklo $n_2 = 1,510$ je velikost Brewsterova úhlu $\theta_B = 56^\circ 29'$ [2].

Jestliže světlo dopadá v Brewsterovu úhlu, je odražený a lomený paprsek k sobě kolmý, pak odražené světlo je polarizováno úplně a lomené světlo jen částečně.



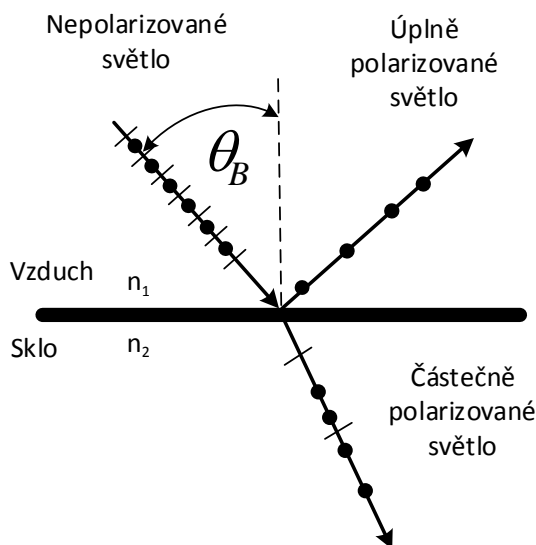
Obr. 1.5: Polarizace odrazem a) obecný úhel b) Brewsterův úhel.

1.4.2 Polarizace světla lomem

Světlo se při lomu polarizuje jen částečně. Vektor \mathbf{E} lomeného světla kmitá převážně s rovinou dopadu. Vektory \mathbf{E} lomeného a odraženého světla svírají pravý úhel. U lomeného světla nikdy nedochází k úplné polarizaci, ale stupeň lineárně polarizovaného světla se dá zvýšit opakovaným lomem světla při průchodu soustavou skleněných destiček. Vztah pro stupeň polarizace má tvar:

$$P = \frac{m}{m + \left(\frac{2n}{n^2-1}\right)^2}, \quad (1.11)$$

kde m určuje počet polarizačních destiček, n je index lomu destiček a P je stupeň polarizace [2].



Obr. 1.6: Polarizace lomem a odrazem.

1.4.3 Polarizace světla dvojlomem

Všechny optické látky se z hlediska šíření světla dají dělit na:

- Izotropní látky v nichž se světlo šíří všemi směry konstantní rychlostí. Patří sem plyny, kapaliny, sklo a látky krystalizující v soustavě krychlové.
- Anizotropní látky v nichž je rychlost světla v různých směrech odlišná. Patří sem tzv. anizotropní krystaly - islandský vápenec, křemen a další látky krystalizující v soustavě čtverečné, kosočtverečné, šesterečné, jednoklonné a trojklonné.

Krystalické látky se dále dají dělit na jednoosé a dvouosé. U jednoosých krystalů nastává štěpení paprsku pouze v jednom směru. U dvouosých látek dochází ke štěpení paprsku ve dvou směrech. V praktické optice se používají především křemen a vápenec patřící mezi jednoosé krystaly.

Při dopadu nepolarizovaného světla na anizotropní krystal dochází k jeho rozdělení na jednotlivých vrstvách iontů krystalové mřížky na dva paprsky:

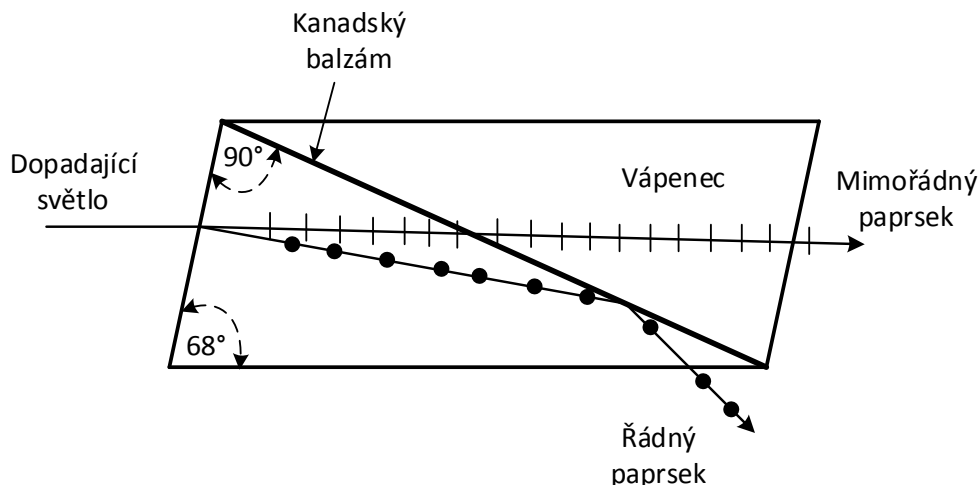
- Řádný (ordinarius) paprsek, který se řídí zákonem lomu a šíří se konstantní rychlostí nezávisle na směru.
- Mimořádný (extraordinarius) paprsek u kterého rychlost šíření závisí na směru šíření.

Každý paprsek se šíří krystalem odlišným směrem, odlišnou rychlostí a mají různé indexy lomu. U obou paprsků dojde k úplné lineární polarizaci a jejich vektory \mathbf{E} kmitají v zájemně kolmé rovině [2].

Nejznámější dvojlomným materiálem je islandský vápenec, z kterého se vyrábí Nikolův hranol, jeden z nejlepších polarizátorů. Nikolův hranol vznikne zbroušení koncových stěn krystalu z 71° na 68° . Následným rozříznutím podél kratší úhlopříčky na dvě identické poloviny a to řezem kolmým k hlavnímu řezu. Obě poloviny jsou vyleštěny a opětovně slepeny pomocí kanadského balzámu, který má výborné optické vlastnosti a jeho index lomu je $n_b = 1,54$.

Dopadající paprsek se průchodem vápence dělí na paprsek řádný a mimořádný. Pro rozhraní vápence s kanadským balzámem je mezní úhel dopadu řádného paprsku roven 68° . U řádného paprsku dochází k totálnímu odrazu, v důsledku toho se při vstupu na první ploše hranolu láme a na rozhraní vápenec - kanadský balzám dopadá pod úhlem větším než α_m , poté je odkloněn ven z krystalu. U paprsku mimořádného nedochází k totálnímu odrazu a paprsek postupuje hranolem v původním směru a vystupuje příčně posunut oproti paprsku dopadajícímu.

Mezi nevýhody Nikolova hranolu patří: jeho poměrně malé zorné pole (24°) a náročnost na spotřebu islandského vápence, stále rostoucího vzácného materiálu. To vedlo k výrobě nových polarizátorů, jenž kompenzují nevýhody Nikolova hranolu, mají větší zorný úhel nebo jsou levnější na výrobu.



Obr. 1.7: Nikolův hranol [3].

Mezi jednopaprskové polarizátory patří: hranol Foucaultův, Glazebrookův, Glanův, Ahresův a Braceův polarizátor, který má zorné pole až 36° .

Mezi dvoupaprskové polarizační hranoly patří Rochův a Wollastonův hranol.

Uměle anizotropními se mohou stát i některé látky izotropní. Izotropní látky nevykazují dvojlomnost, ale působením vnějších sil (mechanickým napětím, elektrickým a magnetickým polem) je možné narušit jejich optickou izotropii materiálu, která vede ke vzniku dvojlomu, který se nazývá jako uměle vyvolaný dvojlom [2].

1.4.4 Polarizace pomocí polarizačního filtru

Polarizační filtr, také nazýván jako polaroid je speciálně vyrobený filtr, který slouží pro získání polarizovaného světla ze světla nepolarizovaného. Filtr je tvořen ze dvou vrstev průhledného plastu, mezi kterými je látka (např. krystalky herapatitu) s relativně dlouhými molekulami, které se při výrobě srovnají tak, aby jejich podlouhlé osy byly vzájemně rovnoběžné.

Při dopadu nepolarizovaného světla na polaroid je intenzita elektrického pole, která je rovnoběžná s řetězcem molekul, pohlcena. Ve směru kolmém je intenzita elektrického pole částečně propuštěna.

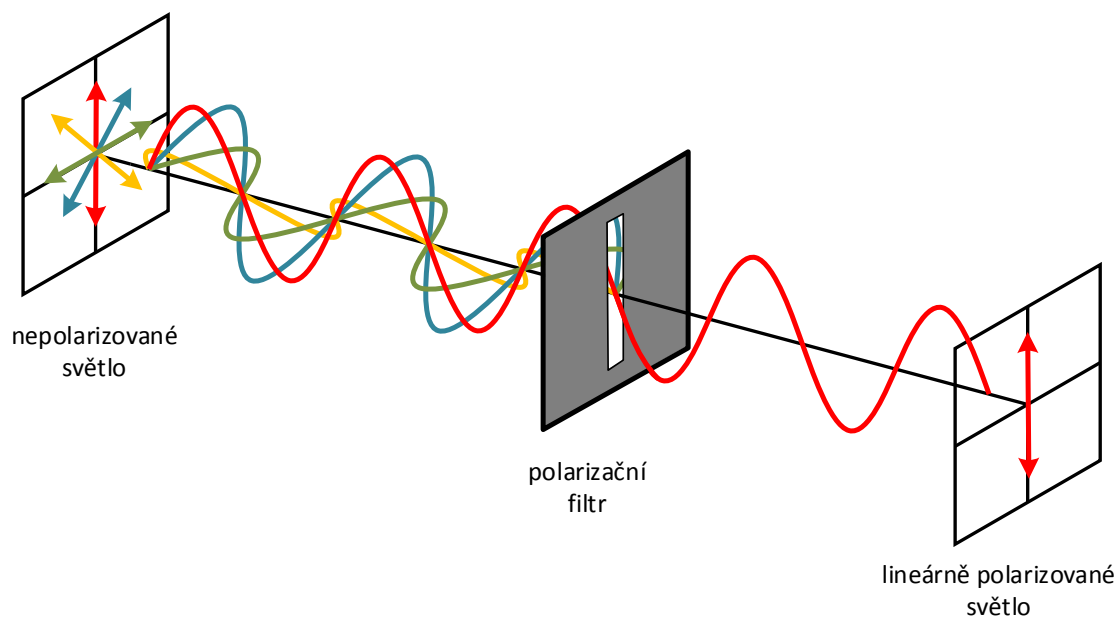
Pokles intenzity lineárně polarizovaného světla popisuje Malusův zákon [4]:

$$I = I_0 \cos^2 \vartheta, \quad (1.12)$$

kde I je intenzita prošlého světla, I_0 je intenzita dopadajícího světla a ϑ je úhel sevřený polarizačními rovinami dopadajícího paprsku a polarizátoru.

Z Malusova zákonu je zřejmé, že intenzita prošlého světla bude maximální ($I = I_0$), právě tehdy když úhel sevřený polarizačními rovinami dopadajícího paprsku

a polarizátoru bude 0° nebo 180° . Naopak, pokud bude úhel $\pm 90^\circ$, tak veškeré světlo bude pohlceno a výsledná intenzita prošlého světla bude nulová.



Obr. 1.8: Průchod nepolarizovaného světla polarizačním filtrem [5].

2 MATEMATICKÝ POPIS POLARIZACE

2.1 Stokesův popis

Pomocí Stokesových parametrů dokážeme popsat nejen plně polarizované světlo, ale také nepolarizované nebo částečně polarizované. Všechny informace v této kapitole byly převzaty z literatury [1], [6] a [7].

Mezi Stokesovými parametry je vztah:

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (2.1)$$

Parametr S_0 popisuje intenzitu celkového světla.

$$S_0 = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (2.2)$$

Parametr S_1 popisuje převahu světla LHP nad světlem LVP.

$$S_1 = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \quad (2.3)$$

Parametr S_2 popisuje převahu L+45P světla nad L-45P světlem.

$$S_2 = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \quad (2.4)$$

Parametr S_3 popisuje převahu RCP světla nad LCP světlem.

$$S_3 = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \quad (2.5)$$

Stokesovy parametry je možné zapsat do matice, kterou nazýváme jako Stokesův vektor pro elipticky polarizované světlo.

$$S = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \\ 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Stokesovy vektory pro nejpoužívanější degenerované polarizační stavy:

$$\mathbf{S}_{\text{LVP}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{\text{LHP}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{\text{L-45}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{S}_{\text{L+45}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{\text{RCP}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{S}_{\text{LCP}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}.$$

Úplně polarizované světlo je vyjádřeno

$$S_0^2 = S_1^2 + S_2^2 + S_3^2, \quad (2.7)$$

částečně polarizované světlo

$$0 < (S_1^2 + S_2^2 + S_3^2) < S_0^2 \quad (2.8)$$

a pro nepolarizované světlo

$$S_1 = S_2 = S_3 = 0. \quad (2.9)$$

Rozdíl mezi Stokesovým a Jonesovým popisem polarizace je v tom, že Stokesovy parametry jsou pouze reálná čísla. Koeficienty Jonesova vektoru jsou obecně komplexní čísla.

Pomocí Stokesových parametrů můžeme definovat stupeň polarizace vlny

$$DOP = \frac{P_{\text{polarizované}}}{P_{\text{polarizované}} + P_{\text{nepolarizované}}}, \quad (2.10)$$

tento vztah můžeme přepsat do podoby:

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}, \quad (2.11)$$

Stupeň polarizace může nabývat hodnot od nuly do jedné. Zcela nepolarizované světlo má $DOP = 0$, pokud je $DOP = 1$ jedná se o světlo zcela polarizované.

Většinou nás nezajímá celková intenzita pro porovnání polarizačních vln, ale pouze stupeň polarizace. Pro takový případ se používají normované Stokesovy parametry, kde $S_0 = 1$, hodnota parametru S_0 je tedy jednotková.

Normované Stokesovy parametry jsou definované:

$$S_{0N} = 1, \quad (2.12)$$

$$S_{1N} = \frac{S_1}{S_0} = \frac{(E_{0x}^2 - E_{0y}^2)}{(E_{0x}^2 + E_{0y}^2)}, \quad (2.13)$$

$$S_{2N} = \frac{S_2}{S_0} = \frac{(2E_{0x}E_{0y} \cos \delta)}{(E_{0x}^2 + E_{0y}^2)}, \quad (2.14)$$

$$S_{3N} = \frac{S_3}{S_0} = \frac{(2E_{0x}E_{0y} \sin \delta)}{(E_{0x}^2 + E_{0y}^2)}. \quad (2.15)$$

2.1.1 Mullerovy matice

Pomocí polarizačních zařízení může dojít ke změně polarizačního stavu popsaného za pomoci Stokesových vektorů. Informace převzaty z literatury [1] a [8].

Jednotlivé parametry vektoru se budou měnit podle vztahů:

$$S'_0 = m_{00}S_0 + m_{01}S_1 + m_{02}S_2 + m_{03}S_3, \quad (2.16)$$

$$S'_1 = m_{10}S_0 + m_{11}S_1 + m_{12}S_2 + m_{13}S_3, \quad (2.17)$$

$$S'_2 = m_{20}S_0 + m_{21}S_1 + m_{22}S_2 + m_{23}S_3, \quad (2.18)$$

$$S'_3 = m_{30}S_0 + m_{31}S_1 + m_{32}S_2 + m_{33}S_3. \quad (2.19)$$

Zápis ve formě matic:

$$\begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}. \quad (2.20)$$

Jak je patrné mezi vstupním a výstupním paprskem platí vztah:

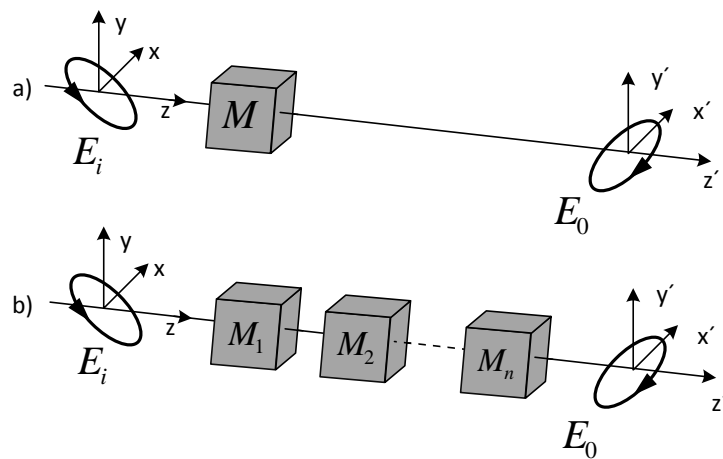
$$\mathbf{S}' = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}, \quad (2.21)$$

kde \mathbf{S} je vstupní, \mathbf{S}' výstupní paprsek popsáný Stokesovým vektorem a \mathbf{M} je polarizační zařízení vyjádřeno pomocí Mullerovy matice (4×4).

Když světelný paprsek prostupuje skrze více optických systémů, tak pro výpočet Stokesova vektoru výstupního paprsku použijeme vzorec:

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_n \dots \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{S}, \quad (2.22)$$

kde $\mathbf{M}_{1,2,\dots,n}$ jsou Mullerovy matice pro individuální optické zařízení.



Obr. 2.1: Průchod paprsku přes a) jedno optické zařízení b) více optickými zařízeními.

Mullerovy matice pro některá polarizační zařízení:

$$\mathbf{M}_{\text{LVP}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_{\text{LHP}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{\text{L-45}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_{\text{L+45}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_{\text{LCP}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_{\text{RCP}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.2 Jonesův popis

Další metodou jak lze popsat polarizační stav světla je pomocí použití Jonesova vektoru, který využívá komplexní, dvouprvkový sloupcový vektor. Informace v této kapitole byly převzaty z literatury [1], [9] a [10].

Jonesovým vektorem lze popsat pouze plně polarizované světlo. Vektory jsou popsány pomocí lineární kombinace ortogonálních bázeových funkcí, představující komplexní obálky a jsou definovány vztahem:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x} e^{j\delta_x} \\ E_{0y} e^{j\delta_y} \end{bmatrix}, \quad (2.23)$$

kde E_x a E_y jsou amplitudy, δ_x a δ_y jsou fáze a $i = \sqrt{-1}$.

Měřitelná veličina u Jonesových vektorů je intenzita I , kterou získáme vynásobením Jonesova vektoru vektorem Hermitovsky sdruženým \mathbf{V}^+ :

$$\mathbf{V}^+ = \begin{pmatrix} E_x^* & E_y^* \end{pmatrix}, \quad (2.24)$$

$$I = \mathbf{V}^+ \cdot \mathbf{V} = E_x E_x^* + E_y E_y^* = E_{0x}^2 (e^{i\delta_x} \cdot e^{-i\delta_x}) + E_{0y}^2 (e^{i\delta_y} \cdot e^{-i\delta_y}), \quad (2.25)$$

kde vztahy $(e^{i\delta_x} \cdot e^{-i\delta_x})$ a $(e^{i\delta_y} \cdot e^{-i\delta_y})$ jsou rovny 1 a výsledná rovnice pro intenzitu má tvar:

$$I = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \quad (2.26)$$

Jonesovy vektory pro nejpoužívanější degenerované polarizační stavy:

$$\mathbf{V}_{\text{LVP}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_{\text{LHP}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_{\text{L-45}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V}_{\text{L+45}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_{\text{RCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}, \quad \mathbf{V}_{\text{LCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}.$$

Pro popis lineární optické soustavy nám slouží Jonesovy matice 2×2 . Matice je tvořena koeficienty lineární kombinace, u kterých platí princip superpozice a tak vstupní vektor J_1 transformujeme na výstupní vektor J_2 . Vztah mezi vstupním a výstupním vektorem je definován obecnými vztahy:

$$\begin{aligned} E_{2x} &= T_{11} E_{1x} + T_{12} E_{1y}, \\ E_{2y} &= T_{21} E_{1x} + T_{22} E_{1y}, \end{aligned} \quad (2.27)$$

které můžeme přepsat do maticového zobrazení

$$\begin{bmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} \equiv \mathbf{J}_2 = \mathbf{T} \cdot \mathbf{J}_1, \quad (2.28)$$

kde koeficienty T_{11}, T_{12}, T_{21} a T_{22} jsou komplexní konstanty popisující optickou soustavu.

Velkou výhodou maticového zápisu je, že složitější optické systémy lze rozložit na jednotlivé, snadno definovatelné elementy (polarizátor, retardér, polarizační rotátory atd.).

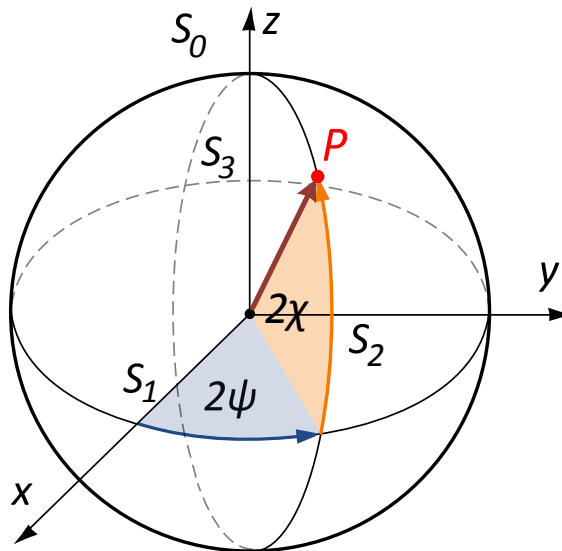
Jonesovy matice pro některá idealizovaná polarizační zařízení:

$$\mathbf{J}_{\text{LVP}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_{\text{LHP}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_{\text{L-45}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{J}_{\text{L+45}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_{\text{RCP}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & i \\ -i & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}_{\text{LCP}} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -i \\ i & 1 \end{bmatrix}.$$

2.3 Poincarého koule

Vhodný a jednoduchý způsob, jak zobrazit stav polarizace je za pomoci Poincarého koule. Střed se nachází v počátku kartézské soustavy souřadnic a Skokesovy parametry S_1, S_2 a S_3 určují kartézské souřadnice bodu P na povrchu nebo uvnitř koule o poloměru S_0 , χ a ψ jsou úhlové souřadnice, které se spočítají pomocí rovnic 1.4, 1.5 a jejich následným přepisem do trigonometrického stavu pomocí rovnic 1.7 a 1.8.



Obr. 2.2: Poincarého koule.

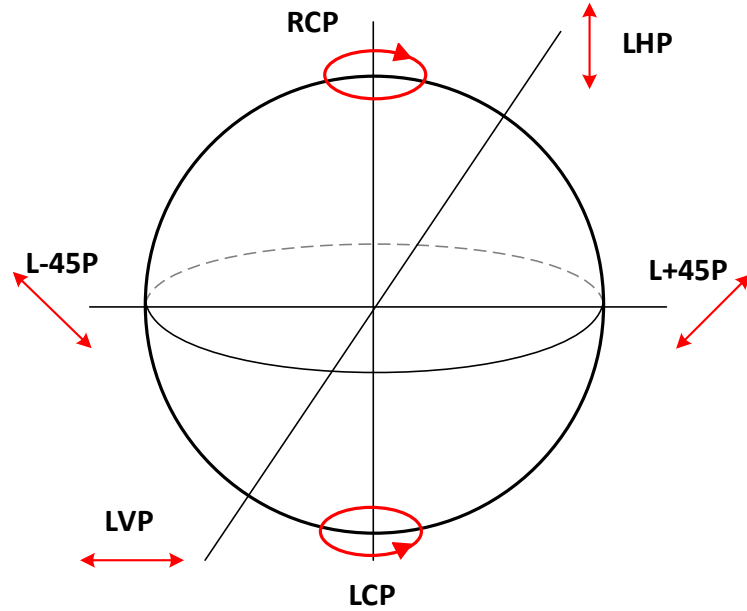
Stokesovy parametry vyjádříme za pomoci poloměru S_0 a úhlů χ a ψ následujícími vzorci [1]:

$$S_1 = S_0 \cos 2\chi \cos 2\psi, \quad (2.29)$$

$$S_2 = S_0 \cos 2\chi \sin 2\psi, \quad (2.30)$$

$$S_3 = S_0 \sin 2\chi. \quad (2.31)$$

Z polohy bodu P na Poincarého kouli dokážeme určit charakter i stupeň polarizace. Jestliže bod P leží přímo na plášti Poincarého koule, tak jde o úplnou polarizaci a $\text{DOP} = 1$. Pokud se bod P nenachází na plášti, ale uvnitř Poincarého koule jde o částečnou polarizaci a $\text{DOP} < 1$. Bod nacházející se ve středu koule znamená, že se jedná o zcela nepolarizované světlo. Z Poincarého koule dokážeme určit také stav polarizace vlny. Když se bod P nachází v rovině xy , tak jde o lineárně polarizovanou vlnu. Přičemž v kladném směru x jde o horizontální, v záporném směru o vertikální polarizaci. V kladném směru y se jedná o lineárně polarizovanou vlnu s úhlem $+45^\circ$ a v záporném směru s úhlem -45° . Bod P ležící na ose z má čistě kruhovou polarizaci, v horní polokouli jde o pravotočivou a v dolní polokouli o levotočivou [1].



Obr. 2.3: Poincarého koule se zobrazením polarizačních stavů vlny.

2.4 Vztah mezi Stokesovým a Jonesovým popisem

Pro převod z Jonesových vektorů na vektory Stokesovy, použijeme vzorce od 2.2 po 2.5.

Pro převod z Stokesova vektoru na Jonesův vektor využijeme vzorce [11]:

$$E_{0x} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} + S_1 \right)}, \quad (2.32)$$

$$E_{0y} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} - S_1 \right)}, \quad (2.33)$$

$$\delta = \delta_y - \delta_x = \pm \arctan \left(\frac{S_3}{S_2} \right), \quad (2.34)$$

Pak Jonesův vektor bude ve tvaru:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} E_{0x} e^{j0} \\ E_{0y} e^{j\delta} \end{pmatrix}. \quad (2.35)$$

Při převodu z Stokesova vektoru na Jonesův musíme také určit stupeň polarizace vlny DOP pomocí vzorce 2.11.

2.4.1 Vztah mezi Jonesovy maticemi a Mullerovy maticemi

Pro převod z Jonesovy matice na matici Mullerovu využijeme vztah [12]:

$$M = A \Gamma A^{-1}, \quad (2.36)$$



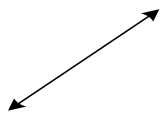
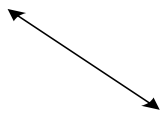
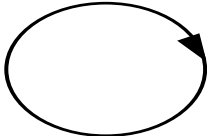
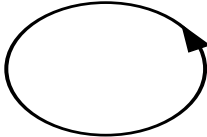
kde Γ je zobecněná transformační matice \mathbf{T} nedopolarizujícího systému ve tvaru

$$\Gamma = \begin{bmatrix} T_{11}T_{11}^* & T_{11}T_{12}^* & T_{12}T_{11}^* & T_{12}T_{12}^* \\ T_{11}T_{21}^* & T_{11}T_{22}^* & T_{12}T_{21}^* & T_{12}T_{22}^* \\ T_{21}T_{11}^* & T_{21}T_{12}^* & T_{22}T_{11}^* & T_{22}T_{12}^* \\ T_{21}T_{21}^* & T_{21}T_{22}^* & T_{22}T_{21}^* & T_{22}T_{22}^* \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

a A je lineární matice

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -i & i & 0 \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

Tab. 2.1: Přehled Stokesových a Jonesových vektorů.

Polarizační stav	Jonesův vektor	Stokesův vektor	Grafický symbol
Lineární horizontální polarizace (LHP)	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Lineární vertikální polarizace (LVP)	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Lineární +45° polarizace (L+45P)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Lineární -45° polarizace (L-45P)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$	
Pravotočivá kruhová polarizace (RCP)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	
Levotočivá kruhová polarizace (LCP)	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$	

3 PŘENOS SIGNÁLU V OPTICKÝCH SYSTÉMECH

Světlo se v optických vláknech šíří v rovině LP_{01} , která se skládá z dvou na sobě kolmých rovin, někdy nazývaných jako degenerované roviny LP_{01x} a LP_{01y} .

Termín degenerované roviny znamená, že obě roviny mají totožnou konstantu šíření světla, tedy mají stejný index lomu ($n_x = n_y$). Nicméně tento stav nastane pouze u optických vláken s dokonale kruhovou souměrností, která je v praxi nezískatelná, jádro je totiž vždy mírně eliptické. Symetrie vlákna se také rozbije sebemenším mechanickým namáháním, ohyby i teplotou.

Vliv nedokonalé kruhové souměrnosti jádra vede k tomu, že v rovině LP_{01x} a LP_{01y} je odlišný index lomu ($n_x \neq n_y$) a vlákno vykazuje dvojlom. To má za následek rozdílnou skupinovou rychlost v sobě kolmých rovinách a to vede k disperznímu jevu.

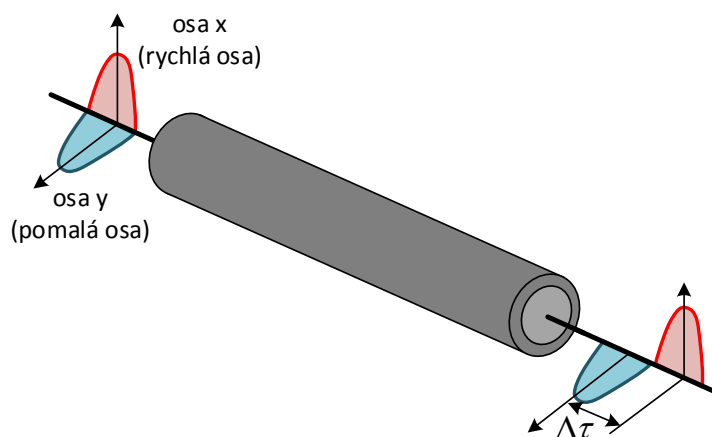
Parametr dvojlom, je definován jako místní absolutní hodnota rozdílu mezi konstantou rychlosti šíření obou rovin [13]:

$$\Delta\beta = |\beta_x - \beta_y| = \frac{2\pi}{\lambda} |n_x - n_y| = \frac{\omega}{c} \Delta n, \quad (3.1)$$

kde c je rychlost světla ve vakuu a Δn je rozdíl indexu lomu, také nazýván jako stupeň dvojlomu. Ve standardních vláknech je stupeň dvojlomu přibližně 10^{-7} .

Za předpokladu, že po celé délce vlákna L je konstantní dvojlom ($\Delta\beta$ je konstantní). Absolutní zpoždění fáze mezi polarizačními rovinami můžeme zapsat jako [13]:

$$\Delta\phi = |\beta_x - \beta_y|L = \Delta\beta L. \quad (3.2)$$

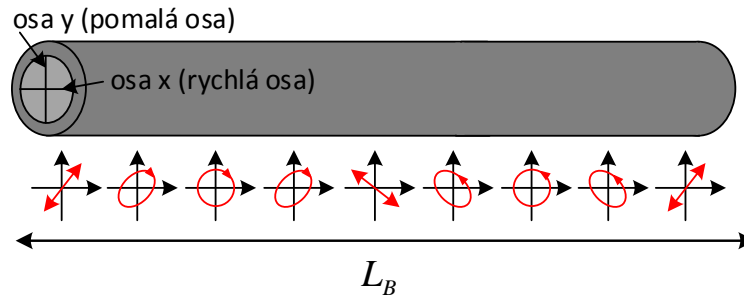


Obr. 3.1: Diferenciální skupinové spoždění ovlivněné dvojlomem optického vlákna.

Vzhledem k tomu, že se světlo v rychlé a pomalé ose šíří různými rychlostmi, bude optický impuls navázaný do optického vlákna po jeho délce průběhu rozšířen v jedné rovině oproti druhé, což vede k časovému rozdílu DGD (rozdílné skupinové zpoždění) $\Delta\tau$. Výraz pro $\Delta\tau$ získáme zderivováním rovnice 3.1 vzhledem k ω [13]:

$$\Delta\tau = \frac{d\Delta\beta}{d\omega}L = \left(\frac{\Delta n}{c} + \frac{\omega}{c} \frac{d\Delta n}{d\omega} \right) L. \quad (3.3)$$

Při průchodu světla vláknem dochází vlivem dvojlomu, také k modifikaci stavu polarizace. Změna stavu polarizace při průchodu je znázorněna na následujícím obrázku.



Obr. 3.2: Stav polarizace ovlivněn dvojlomem při průchodu optickým vláknem [13].

Při navázání L+45P polarizovaného světla do vlákna dojde k jeho rozložení do části vyrovnané s pomalou rovinou (osa y) a do druhé částí zarovnané s rychlou rovinou (osa x). Výstup SOP bude záviset na fázovém rozdílu mezi fázemi os x a y .

Na obrázku je znázorněno, jak se mění SOP. Kruhově pravotočivě polarizované světlo je dosaženo, když fázové zpoždění je $\pi/2$. Lineárně -45° polarizované světlo je dosaženo, když $\Delta\varphi = \pi$. Při hodnotě fázového zpoždění 2π je stav polarizace stejný jako na vstupu.

Záznejová délka (beat length) je parametr vlákna, jak dobře uchovává stejný stav polarizace. Značí délku, při které nastane zpomalení mezi oběma fázemi o $[13]$:

$$\Delta\beta L_B = 2\pi, \quad (3.4)$$

to vede k:

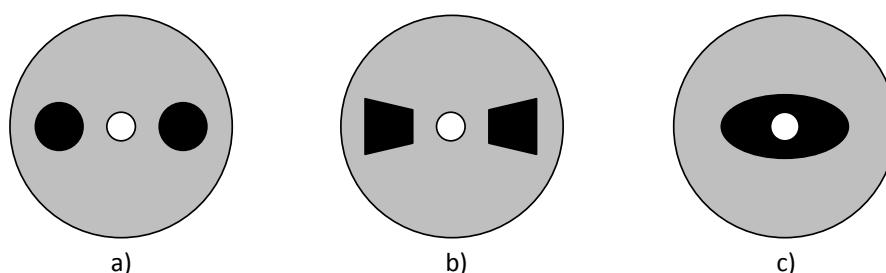
$$L_B = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{\Delta n}. \quad (3.5)$$

Typické hodnoty L_B pro standardní jednovidová vlákna se pohybuje v rozmezí mezi 1 m až 50 m. V případě, že stav polarizace vstupního světla odpovídá jedné z os vlákna, bude jeho stav polarizace zachován po celé délce vlákna a to i v případě ohýbání vlákna. Tato vlastnost je využívána k udržení polarizace v polarizaci zachovávajících vláknech PM. Tyto vlákna mají uměle vytvořený silný dvojlom.

3.1 Typy PM vláken

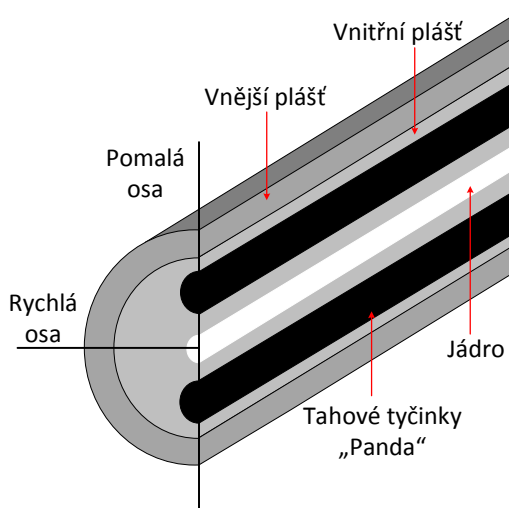
Polarizaci zachovávající vlákno dostaneme zavedením silného dvojlomu a to vložením dvou tahových tyčinek z modifikovaného složení skla s různými stupni tepelné roztažnosti a to na opačných stranách jádra. U těchto vláken tahové tyčinky způsobí mechanické namáhání, které zaručí dobré pnutí po celé délce. Známe dva typy takto vytvořených PM vláken: Panda a Motýlek (Bow-tie), liší se tvarem tahových tyčinek.

Další variantou vytvoření PM vlákna je, že jádro elipticky opláštíme jiným materiálem. Eliptický tvar zajišťuje zvýšení dvojlomu bez použití mechanického namáhání. Takové vlákno se nazývá Eliptické PM vlákno.



Obr. 3.3: PM vlákna: a) Panda b) Motýlek c) Eliptické.

PM vlákna se používají zejména v koherentních systémech, senzorických systémech a v telekomunikačních sítích, kde spojují specifické prvky. Téměř vůbec se nepoužívají k přenosu na dlouhé vzdálenosti a to vzhledem k jejich velké ceně a většímu útlumu oproti jednovidovým vláknům.



Obr. 3.4: Průřez PM vlákna typu Panda [14].

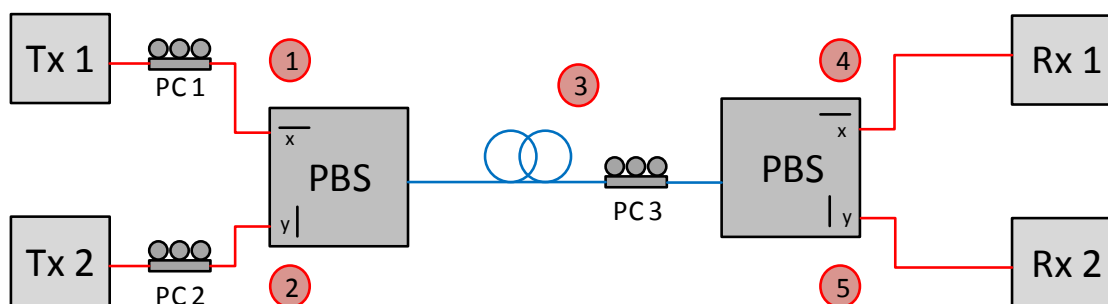
3.2 Polarizační multiplex

Optický signál se prostřednictvím vlákna šíří ve dvou na sobě kolmých polarizačních rovinách. Myšlenkou polarizačního multiplexu je využití každé roviny pro přenos na sobě nezávislých signálů, tím se zdvojnásobí přenosové pásmo.

Princip polarizačního multiplexu lze přirovnat k technologii používání v rádiových systémech, kde také vysíláme signál pomocí dvou ortogonálně polarizovaných rovin a pro příjem využíváme dvě rozdílně orientované a polarizované antény. Detekce je možná za předpokladu, že při průchodu sítí byla zachována ortogonalita obou signálů. Ta se však při průchodu signálu vláknem porušuje vlivem jeho nedokonalostmi symetrie jádra a dvojlomem [15].

Polarizační multiplex má dva vstupy, jeden vstup s horizontální polarizací signálu a druhý s vertikální polarizací signálu. Oba signály je potřeba upravit tak, aby byly rovnoběžné se svojí rovinou polarizace a k sobě byly vzájemně kolmé. Takto vznikne multiplexovaný signál skládající se z dvou různě modulovaných optických signálů, které mohou být přenášeny na stejné vlnové délce. Pro správné natočení signálu do požadované polarizace se využívá polarizační kontrolér PC (Polarization Controller) a umísťuje se vždy před polarizační dělič (Polarization Beam Combiner/Splitter). Polarizační dělič se používá pro navázání signálů z dvou vláken do jednoho společného vlákna a opačně.

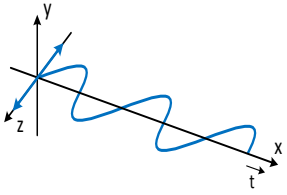
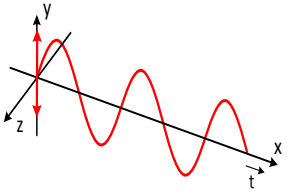
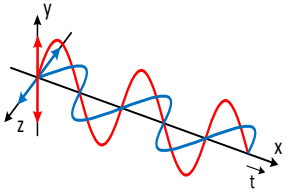
Základní schéma polarizačního multiplexu (POL-MUX) je zobrazeno na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Princip polarizačního multiplexu.

V tab. 3.1 jsou znázorněné stavy polarizace pro jednotlivé body z obr. 3.5.

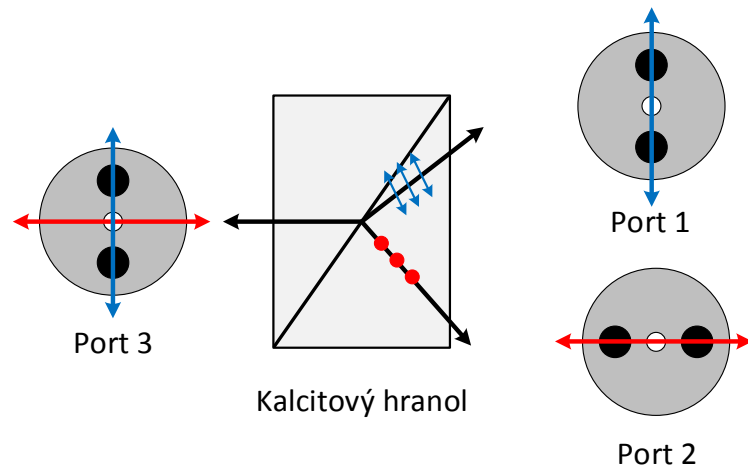
Tab. 3.1: Stav polarizace signálu v jednotlivých bodech polarizačního multiplexu.

Bod	1 a 4	2 a 5	3
Polarizační stav signálu			

3.2.1 Polarizační dělič

Polarizační splitter (PBS) rozděljuje vstupní signál na dva signály, na signál z horizontální roviny a druhý z vertikální. Další využití polarizačního děliče je jako combiner (PBC), který tyto dva signály spojí do jednoho.

Princip fungování polarizačního splitteru je znázorněna na obr. 3.6. Polarizační splitter je nejčastěji tvořen dvěma navzájem stmelenými trojbokými hranoly, kde dělicí vrstva mezi jednotlivými hranoly zaručuje průchod světelného signálu jedné polarizační roviny a zbylá část světelného signálu je odkloněna a roviny pak jsou na sebe vzájemně kolmé (svírají úhel 90°).



Obr. 3.6: Princip polarizačního děliče.

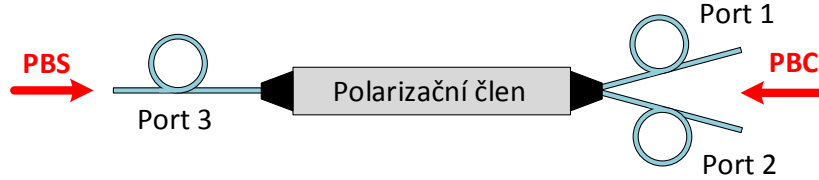
Polarizační splitter je možné popsat za pomoci kartézských souřadnic. Polarizovaný laserový paprsek se šíří podél osy x . Koeficienty odrazu a přenosu jsou R_x, T_x a R_y, T_y a splňují rovnost:

$$R_x + T_x = R_y + T_y = 1. \quad (3.6)$$

Ztráty světelné energie při přenosu vláknem jsou vyjádřeny parametrem X . Celková hodnota světelného toku vracejícího se do zdroje záření Φ je vyjádřena vztahem:

$$\Phi = XT_x \Phi_0, \quad (3.7)$$

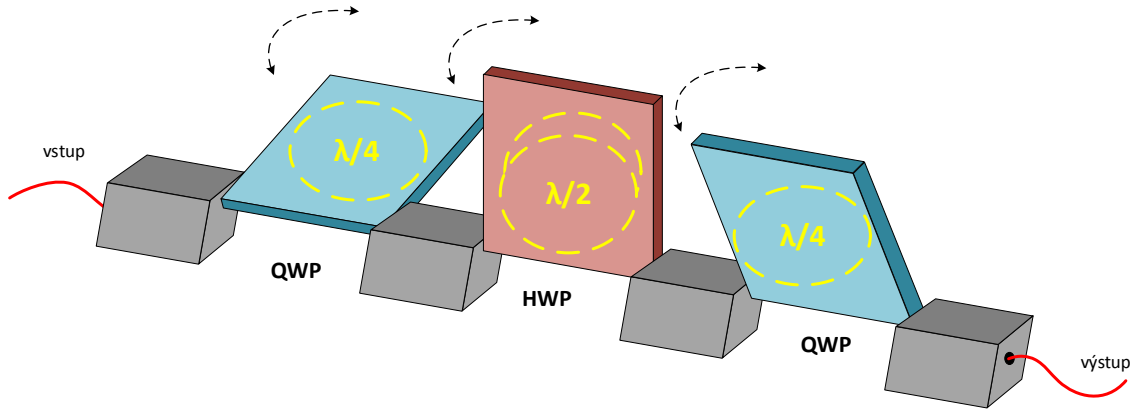
kde Φ_0 představuje počáteční hodnotu světelného toku zdroje záření [16].



Obr. 3.7: Polarizační dělič (Combiner/Splitter).

3.2.2 Polarizační kontrolér

Polarizační kontrolér (PC) se skládá ze tří fázových destiček. Kde první fázová destička transformuje vstupní signál s libovольnou polarizací na polarizaci lineární. Tato destička se nazývá čtyřvlnná (QWP). Druhá destička mění úhel lineární polarizace a nazývá se jako půlvlnná (HWP). Poslední, třetí čtyřvlnná destička (QWP) natáčí lineární polarizovaný signál na jakýkoliv stav polarizace [17].

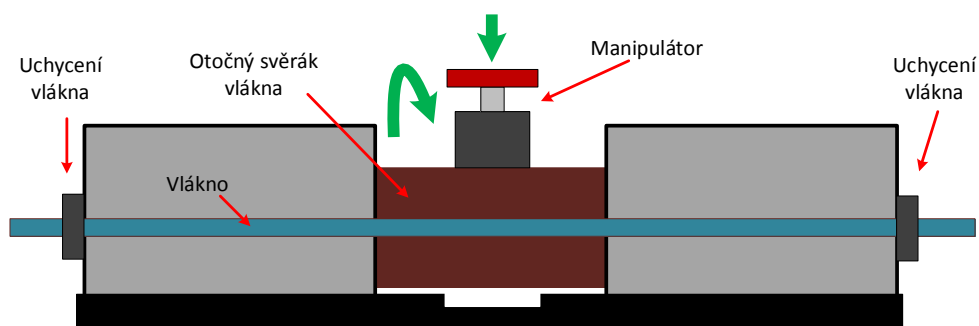


Obr. 3.8: Polarizační kontrolér (PC).

Na obr. 3.8 lze vidět provedení polarizačního kontroléru. Z obrázku je patrné, že v první a třetí destičce je navinuta pouze jedna smyčka optického vlákna a v druhé destičce jsou smyčky dvě. Na těchto smyčkách dochází k napětí optického vlákna

a to způsobuje dvojlom nepřímo úměrný druhé mocnině průměru smyčky. Úpravou průměru a počtem smyček lze vytvořit jakoukoliv n -vlnnou zněnu na dané destičce. Vzhledem k faktu, že čím větší ohyb vlákna vytvoříme, zvýšíme také vložený útlum, musí být průměr smyček dostatečně velký.

Druhý přístup je založen na změně zkrutu a tlaku na vlákno a používá se pro to Babinetův-Soleilův kompenzátor znázorněný na obr. 3.9 [17]. Kompenzátor obsahuje otočný svěrák vlákna, který se otáčí po celém průměru vlákna. V důsledku působení tlaku a zkrutu na vlákno vytvoříme lineární dvojlom, který se mění s působící silou a zkrutem na optické vlákno. Jednoduché stlačení a pootočení svěráku vytváří jakýkoliv požadovaný stav polarizace.



Obr. 3.9: Polarizační kontrolér používající Babinetův-Soleilův kompenzátorový princip.

4 VYUŽITÍ POLARIZAČNÍHO MULTIPLEXU

Jak bylo probráno v kapitole 3.2. Polarizační multiplex využívá technologii, která umožňuje v každé polarizační rovině optické vlny přenos na sobě nezávislých informací, ať v jednosměrném, tak i v obousměrném přenosu. Tím tedy navýšíme šířku přenosového kanálu až na dvojnásobek.

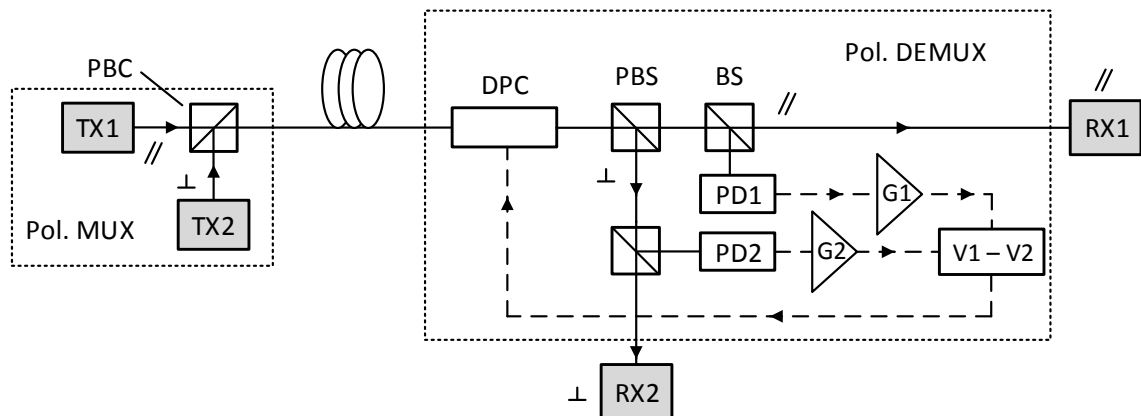
Nevýhodou této technologie jsou značně vysoké finanční náklady na prvky pracující s polarizačně multiplexovaným signálem. V budoucnu má tato technologie vysokou využitelnost zejména tam, kde je pokládka nových kabelů, nebo jiných způsobů zvyšování přenosového kanálu velmi obtížná, nákladná, nebo téměř neproveditelná [18].

Problém pro nasazení této technologie spočívá ve změnách polarizace optické vlny při průchodu signálu optickou trasou. Největší vliv na tyto změny má především teplota a mechanické namáhání vlákna.

4.1 Použití polarizačního multiplexu a jeho řešení

V této kapitole je uvedeno několik možných řešení použití polarizačního multiplexu.

Systém pro automatické oddělení dvou polarizačních rovin v polarizačním multiplexu, aniž by bylo nutné upravit hardware nebo software na straně vysílače a přijímače. Podle [18].



Obr. 4.1: Konceptní schéma navrženého demultiplexoru s využitím automatického systému zpětné vazby [18].

Na obr. 4.1 je uvedeno schéma navrženého demultiplexoru, kde nepřerušovaná čára značí optickou trasu, tečkovaná čára značí elektrickou kontrolu. PBC je polarizační slučovač, PBS: polarizační rozdělovač, BS: dělič, DPC značí dynamický regulátor polarizace, G1 a G2: elektrické zesilovače a PD1 s PD2 značí fotodetektory.

Matematický popis optického výkonu pro osy x a y je:

$$P_x = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) + \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \cos 2\epsilon_1 \cos 2\theta_1,$$

$$P_y = \frac{1}{2}(P_1 + P_2) - \frac{1}{2}(P_1 - P_2) \cos 2\epsilon_1 \cos 2\theta_1,$$

kde ϵ_1 je eliptický úhel a θ_1 je úhel orientace daného optického proudu.

Pro automatické a efektivní oddělení obou rovin se monitoruje velikost optického signálu pro obě roviny. Část signálu každé roviny je odebrána a přivedena na nízkorychlostí fotodetektory (PD1 a PD2), které převádí optický signál na elektrický, následně zpracovaný nízkosumovými elektrickými obvody (G1 a G2). Rozdíl velikosti výkonu mezi polarizačními rovinami (P_x a P_y) je přiveden do bloku rozdílového napětí (V1-V2) a je vyjádřen:

$$V_1 - V_2 = \alpha_1 P_x - \alpha_2 P_y = \frac{1}{2}(\alpha_1 - \alpha_2)(P_1 + P_2) + \frac{1}{2}(\alpha_1 + \alpha_2)(P_1 - P_2) \cos 2\epsilon_1 \cos 2\theta_1,$$

kde α_1 a α_2 značí koeficienty odezvy obou fotodetektorů a jejich odpovídajících zesílení obvodů. Prostřednictvím elektrického zesílení, vyvažováním nebo kalibračním programem mohou být upravena tak, aby si byly rovny ($\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha$). Tím zjednodušíme vztah do podoby:

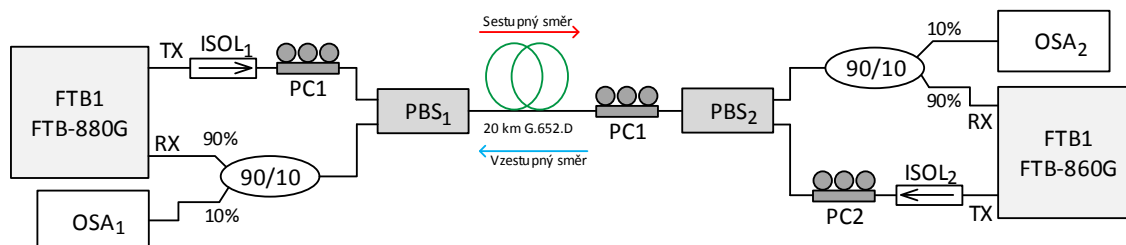
$$\Delta V = V_1 - V_2 = \alpha(P_1 - P_2) \cos 2\epsilon_1 \cos 2\theta_1.$$

Tak dlouho dokud existuje rozdíl výkonu mezi oběma kanály ($P_1 - P_2 \neq 0$), je rozdíl napětí mezi oběma rovinami závislý na úhlech ϵ a θ , které mohou být měněny dynamickým polarizačním kontrolerem. Proto maximalizováním kalibračního napětového rozdílu (ΔV), lze účinně minimalizovat přeslechy a snadno oddělit obě polarizační roviny. Více informací je uvedeno v literatuře [18], z které bylo čerpáno.

R.Šifta se ve své dizertační práci [15] v jedné ze svých částí podrobně věnuje polarizačnímu multiplexu. Před praktickou realizací polarizačního multiplexu vše nejdříve simuloval. Pro simulaci použil prostředí VPI photonics. Prvně se zabýval současným přenosem datového 10G signálu spolu s analogovým šumem, přičemž oba signály

jsou odděleny pomocí polarizačního multiplexu. Následně se zabýval použitím polarizačního multiplexu pro oddělení směru přenosů. Na základě teoretických podkladů a výsledků simulačních modelů realizoval oba návrhy.

Jako finální laboratorní měření provedl pro polarizační multiplex využívající oddělení směrů přenosu, schéma zapojení na obrázku 4.2.



Obr. 4.2: Schéma měření – polarizační multiplex pro oddělení směrů přenosu [15].

Signál z vysílače pro sestupný směr prochází přes izolátor $ISOL_1$, který eliminuje rizika poškození laseru SFP+ modulu při nastavování úhlu polarizačních rovin na polarizačním splitteru. Z izolátoru $ISOL_1$ je signál přiveden na polarizační kontrolér PC_1 , pomocí něhož se vhodně nastaví úhel polarizace. Poté signál vstupuje do polarizačního splitteru PBS_1 . Vhodné nastavení bylo provedeno pomocí spektrálního analyzátoru na základě maximálního navázaného výkonu. Optický signál procházel skrz 20 km dlouhé optické vlákno a následně na polarizační kontrolér PC_3 , který nastaví úhel polarizace tak, aby na výstupu z polarizačního splitteru PBS_2 byla maximální výkonová úroveň. Poté je signál rozdělen v poměru 90/10, kde 10 % signálu slouží pro monitorování optickým spektrálním analyzátozem OSA_2 a zbylých 90 % signálu je přivedeno na přijímací část SFP+ modulu. Pro vzestupný směr je zapojení analogické.

Měřením zjistil, že natáčení polarizace nemá nepříznivý vliv na zpoždění a jeho kolísání, z čehož lze usoudit vyšší odolnost služeb pracujících v reálném čase.

Z výsledků měření v porovnání s výsledky měření přenosu datového signálu a šumu s využitím polarizačního multiplexu jasně vyplývá, že pro současný přenos dvou polarizačně oddělených různých signálů v jednom směru je přenosový systém podstatně náchylnější na změnu polarizace signálu než v případě, kdy je polarizační multiplex použit pro oddělení směrů přenosu [15].

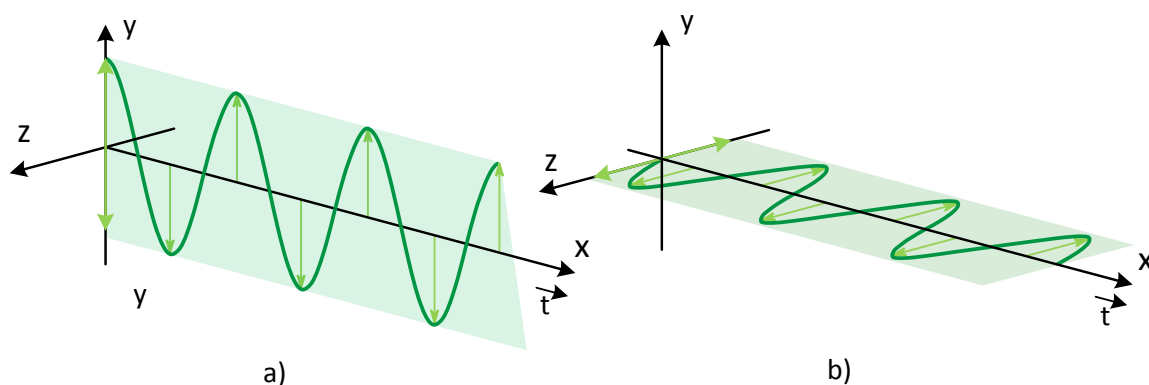
5 ZAPOJENÍ POLARIZAČNÍHO MULTIPLEXU

V této kapitole jsou uvedeny teoretické předpoklady pro zapojení polarizačního multiplexu.

Nejprve je popsáno zapojení polarizačního multiplexu s polarizací zachovávajícím vláknem. Následně s vláknem jednovidovým, u kterého je popsána problematika polarizace právě v jednovidových optických vláknech a jako poslední je v této kapitole uvedena možná kombinace polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem a to ve dvou možných provedeních.

5.1 Zapojení pracoviště s PM vláknem

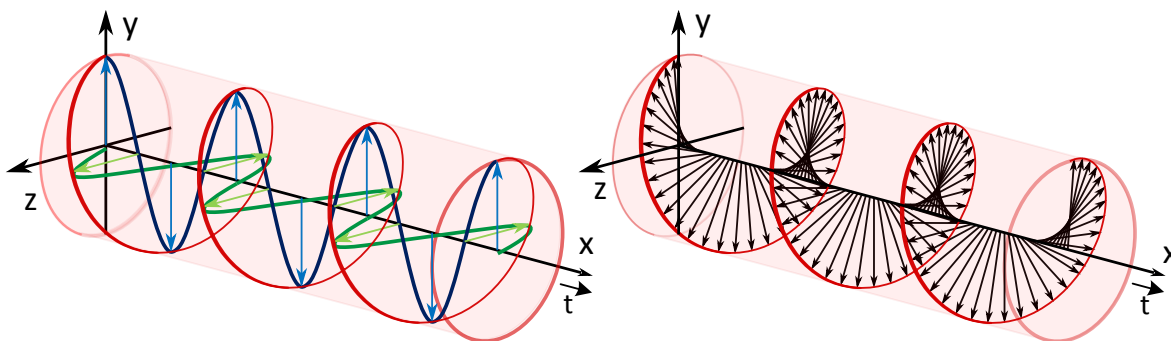
Signály z vysílačů TX1 a TX2 byly prostřednictvím polarizačních kontrolérů PC1 a PC2 navázány do prvního polarizačního děliče PBS1. Oba signály jsou lineárně polarizované, ale mají špatný úhel natočení, proto je potřeba je natočit pouze do jedné polarizační roviny a to v našem případě do stavu polarizace LVP. Natočení provedeme za pomoci polarizačních kontrolérů. Takto upravené signály z obou vysílačů připojíme na první polarizační dělič PBS1, v kterém se jeden ze signálů pootočí z polarizace LVP do stavu polarizace LHP, graficky znázorněné na obrázku 5.1.



Obr. 5.1: Stav polarizace: a) LVP b) LHP.

Výsledný multiplexovaný signál je přenášený prostřednictvím PM vlákna, v kterém dochází k vektorovému součtu obou rovin a vzniká pravotočivě kruhová polarizace, graficky znázorněná na obr. 5.2.

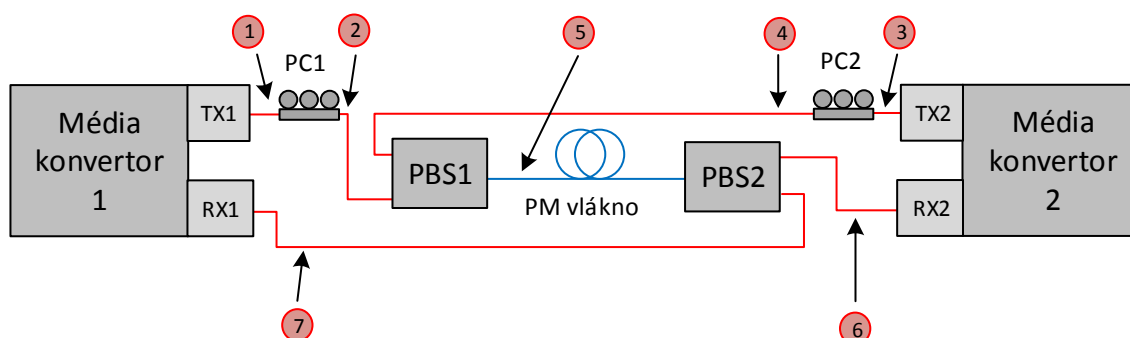
V této podobě přichází na vstup druhého polarizačního děliče PBS2 a dochází k demultiplexování na dva signály, na signál vertikální roviny a na signál horizontální roviny, který je natočen zpět do vertikální polarizace. Následně jsou oba samostatné signály přivedeny na přijímače RX1 a RX2 obou média konventorů.



Obr. 5.2: Pravotočivě kruhová polarizace [19].

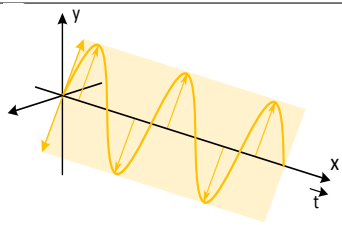
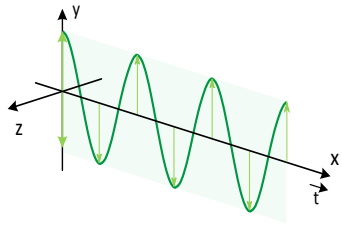
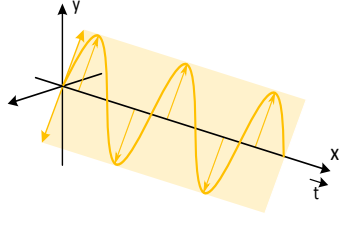
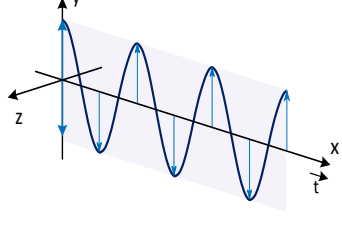
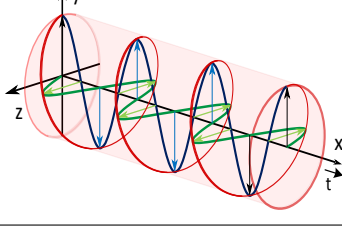
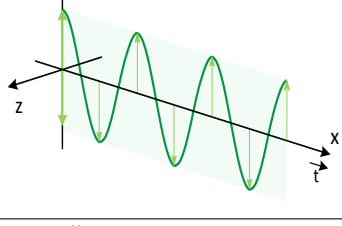
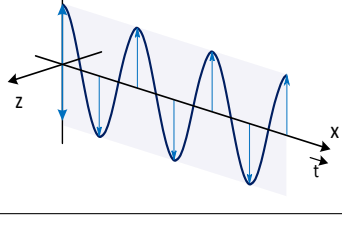
Aby vše fungovalo jak má, je potřeba zajistit stejnou hodnotu útlumu z obou zdrojů světla. Pokud by tomu tak nebylo, tak signál s nižší hodnotou útlumu se stává po průchodu prvního polarizačního děliče dominantní. Tím dojde k nesprávnému fungování celého zapojení.

Zapojení celého pracoviště je znázorněno na obr. 5.3. V obrázku zapojení je znázorněno několik bodů 1-7, pro každý z nich je v tab. 5.1 uvedena: polarizace, Jonesův vektor, Stokesův vektor a grafické znázornění polarizačního stavu.



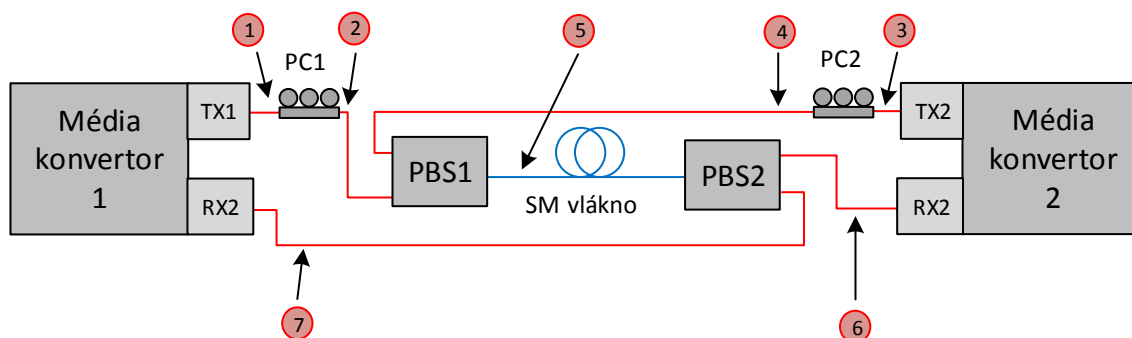
Obr. 5.3: Zapojení pracoviště s využíváním dvou polarizačních rovin jako nezávislých signálů s PM vláknem.

Tab. 5.1: Stav polarizace signálu v jednotlivých bodech pracoviště s PM vláknem.

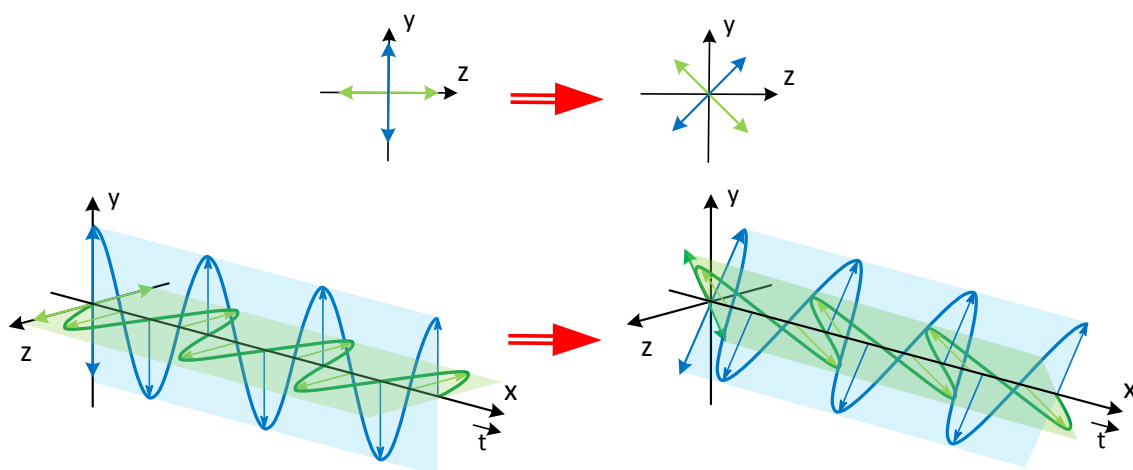
Bod	Polarizace	Jonesův vektor	Stokesův vektor	Polarizační stav (graficky)
1	LVP-LHP	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
2	LVP	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
3	LVP-LHP	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
4	LVP	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
5	RCP	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	
6	LVP	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	
7	LVP	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	

5.2 Zapojení pracoviště s SM vláknem

Zapojení pracoviště s jednojádrovým vláknem je obdobné jako zapojení s polarizací zachovávajícím vláknem, které bylo vyměněno za jednojádrové vlákno. V důsledku nekonstantního dvojlomu vlákna po celé jeho délce dochází k přelivu energií mezi oběma polarizačními rovinami, graficky znázorněno na obr. 5.5. Polarizace se průchodem vlákna mění v závislosti na délce vlákna, změně teploty, ohybům a stlačení.



Obr. 5.4: Zapojení pracoviště s využíváním dvou polarizačních rovin jako nezávislých signálů s SM vláknem.



Obr. 5.5: Změna polarizace způsobená při průchodu jednojádrovým optickým vláknem [20].

5.2.1 Dvojlom v jednovídrových vláknách

Tato podkapitola se podrobněji zabývá dvojlomem v jednovídrových optických kabelech a doplňuje tak informace z kapitoly 3. Čerpáno z literatury [20].

Dvojlom způsobený mechanickým namáháním, elektrickým a magnetickým polem lze pochopit nebo modelovat jako změna indexu lomu jádra. Vezměme si slabě vodící vlákno s jádrem o indexu jádra n_{c0} a indexu pláště n_{c1} . Pro slabě vodící vlákna může být efektivní index lomu N aproximován jako:

$$N \approx n_{c1} + b(n_{c0} - n_{c1}), \quad (5.1)$$

kde b je zobecněný index

$$b = \frac{N^2 - n_{c1}^2}{n_{c0}^2 - n_{c1}^2}. \quad (5.2)$$

Pokud se index jádra změní Δn_{c0} , je účinek na efektivní index

$$\Delta N \approx \left(b + \frac{V}{2} \frac{db}{dV} \right) \Delta n_{c0}, \quad (5.3)$$

kde V je definováno vzorcem

$$V = ka\sqrt{n_{c0}^2 - n_{c1}^2}. \quad (5.4)$$

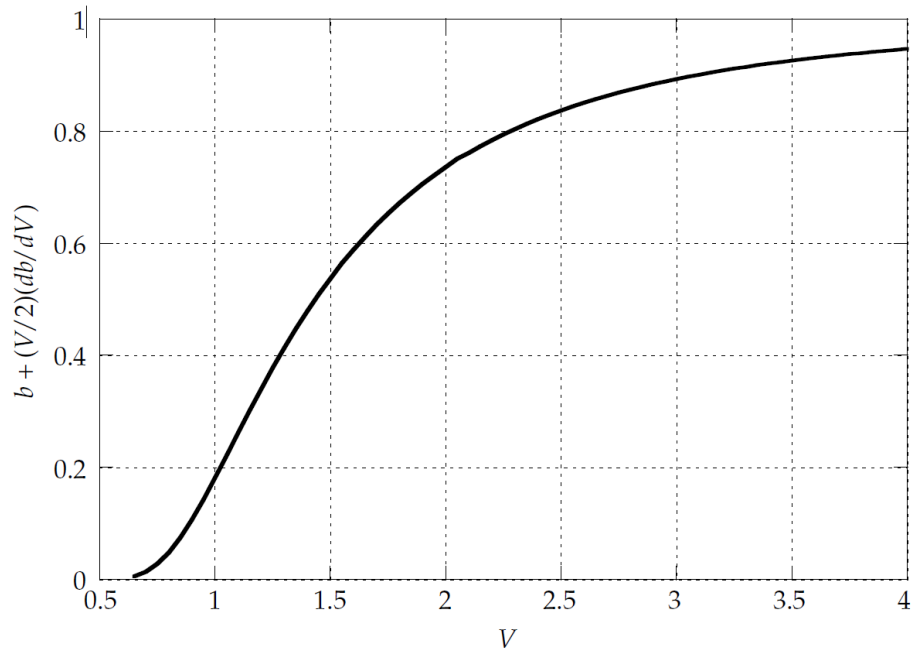
Je-li vlákno narušeno tak, že efektivní indexy lomu osy x a osy y jsou různé, pak ΔN pro obě osy má také odlišné hodnoty. Výsledný modální dvojlom a záznejová délka je

$$B \approx \left(b + \frac{V}{2} \frac{db}{dV} \right) |\Delta n_{c0x} - \Delta n_{c0y}| \quad (5.5)$$

a

$$L_B \approx \frac{\lambda}{\left(b + \frac{V}{2} \frac{db}{dV} \right) |\Delta n_{c0x} - \Delta n_{c0y}|}. \quad (5.6)$$

Použitím rovnic se pokusíme odhadnout dvojlom vláken způsobený mechanickým namáháním nebo odchylkami indexu jádra. Pro $1,8 < V < 2,4$, $b + (V/2)(dv/dV)$ je mezi 0,67 a 0,82 je znázorněno na obr. 5.6. Můžeme jednoduše vzít $b + (V/2)(dv/dV)$ jako 1 pro jednoduchý odhad modálního dvojlomu a záznejové délky. Pak je modální dvojlom $\Delta n_{c0x} - \Delta n_{c0y}$ a záznejová délka $\lambda/|\Delta n_{c0x} - \Delta n_{c0y}|$.



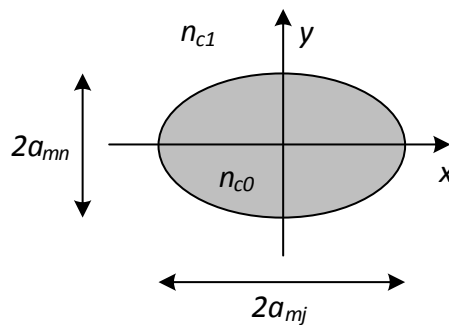
Obr. 5.6: $b + (V/2)(db/dV)$ jako funkce V [20].

Pro odhad geometrického dvojlomu B_G , jenž je způsobený nedokonalostí geometrických rozměrů kruhového jádra můžeme využít zjednodušený vzorec

$$B_G \approx \frac{3\pi^2}{2} \frac{V_{mj}}{(V_{mj} + 1)^4} n_{c0} \Delta^2 e^2, \quad (5.7)$$

kde

$$e^2 = 1 - \frac{a_{mn}^2}{a_{mj}^2}. \quad (5.8)$$



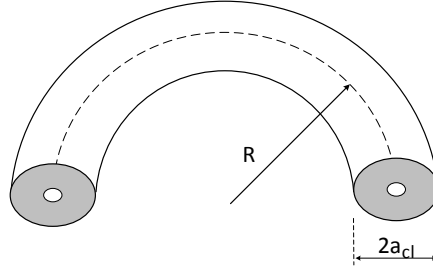
Obr. 5.7: Průřez eliptickým jádrem optického vlákna.

Dvojlom způsobený vnějším mechanickým namáháním

Pokud je jednojádrové optické vlákno vystaveno bočnímu tlaku, ohybu nebo silnému elektrickému poli, vzniká lineární dvojlom. Při mechanickém zkroucení nebo působení silného axiálního magnetického pole na kruhový průřez vlákna, vzniká kruhový dvojlom.

Ohýbání

Vlivem ohýbání optického vlákna dojde k jeho přerušení symetrie a vzniká tak dvojlom. Ohýbání bez prodlužování se označuje jako čisté ohýbání a ohýbání tahem a tlakem na vlákno se nazývá jako ohýbání pod napětím. Vlákno je ohnuté do kruhového oblouku o poloměru R , který je mnohem větší než poloměr opláštění a_{cl} .



Obr. 5.8: Ohyb na vlákně.

Čisté ohýbání

Lineární dvojlom způsobený čistým ohybem je číselně vyjádřen pro vlnovou délku $1,55 \mu\text{m}$ jako:

$$\Delta\beta_B = \beta_x - \beta_y = -5,49 \cdot 10^5 \left(b + \frac{V}{2} \frac{db}{dV} \right) \frac{a_{cl}^2}{R^2}. \quad (5.9)$$

Ohýbání pod napětím

Pokud se vlákno v důsledku ohybu a protažení prodlouží z délky L na délku δL . Dochází k protažení vlákna, ke kterému u čistého ohýbání nedochází. Tento fakt je potřeba zahrnout do výpočtu pro lineární dvojlom.

Poté je lineární dvojlom číselně vyjádřen pro vlnovou délku $1,55 \mu\text{m}$ jako:

$$\Delta\beta_{BT} = \beta_x - \beta_y = -5,11 \cdot 10^5 \frac{a_{cl}}{R} \left(\frac{a_{cl}}{R} + 3,59 \frac{\delta L}{L} \right). \quad (5.10)$$

Mechanické zkroucení

Dlouhé úseky vláken jsou často neúmyslně zkrouceny. V některých aplikacích jsou však vlákna zkroucena záměrně. Mechanické zkroucení vlákna vede ke kruhovému dvojlomu a rotaci osy.

Kruhový dvojlom způsobený mechanickým zkroucením vlákna je numericky popsán rovnicí

$$\Delta\beta_{TW} = \beta_R - \beta_L = -0,148 \frac{\Theta}{L} F_{TW}(V), \quad (5.11)$$

kde Θ zastupuje úhel pod kterým je vlákno zkrouceno, L délka vlákna a $F_{TW}(V)$ je funkce zobecněné frekvence.

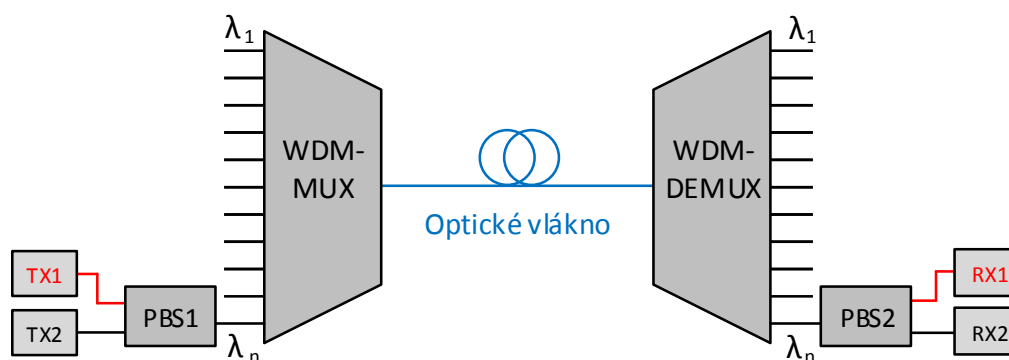
5.3 Kombinace polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem

Polarizační multiplex umožňuje zdvojnásobení šířky přenosového pásma, to nám v praxi vzhledem k jeho vysoké zaváděcí ceně nestačí a proto se počítá s jeho kombinací s dalšími multiplexními systémy. Pomocí této kombinace docílíme k několikanásobnému zvětšení šířky přenosového pásma.

Popsána bude kombinace polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem. Celkovou šířku přenosového pásma určuje hustota vlnového multiplexu a to tedy odstup nosných vlnových délek, tím získáme počet použitelných kanálů. Díky polarizačnímu multiplexu můžeme každý z kanálů použít dvakrát a zvýšit tak počet přenášených kanálů až na dvojnásobek.

Kombinace polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem je možné provést dvěma způsoby. První možný způsob je realizovaný tak, že každá vlnová délka je separátně polarizačně multiplexována. Před vlnovým multiplexem jsou za pomoci polarizačního splitteru PBS1 polarizačně multiplexovány dva nezávislé signály z vysílačů TX1 a TX2, oba signály jsou na stejné vlnové délce λ_n . Vzniklý signál je pomocí vlnového multiplexu přenášen po optickém vlákně až do vlnového demultiplexeru, který předá odpovídající signál o vlnové délce na správný výstup demultiplexoru, kde je umístěn druhý polarizační splitter PBS2, jenž signál zpět rozdělí na dva samostatné signály a ty předá na příslušné přijímače RX1 a RX2.

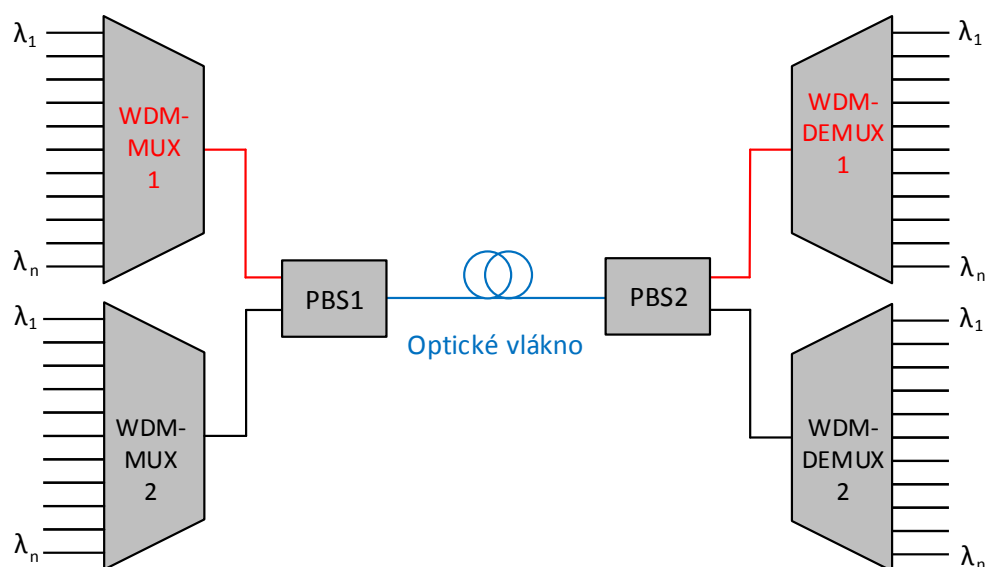
Výhodou této varianty je, že nemusí řešit polarizaci signálů u vysílačů pracujících na jiných vlnových délkách. Nevýhodou je velká finanční náročnost, čím více vlnových délek využíváme k polarizačnímu multiplexu, tím navyšujeme počet polarizačních splitterů [15]. Tato varianta je znázorněna na obr. 5.9.



Obr. 5.9: Blokové schéma polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem varianta 1.

Druhé možné zapojení se liší umístěním polarizačního multiplexu. V tomto případě je polarizační multiplex umístěn za dva vlnové multiplexery, kde každý z nich přenáší odlišné informace na stejných vlnových délkách. Pomocí polarizačního splitteru PBS1 dojde k jejich polarizační multiplexaci a takto jsou signály přenášeny po optickém vlákně, až k polarizačnímu splitteru PBS2, kde jsou oba vlnově multiplexované signály rozděleny a přivedeny na odpovídající vstup vlnového demultiplexu.

Výhodou této varianty je použití pouze jednoho polarizačního multiplexeru a demultiplexu, nezáleží na počtu kanálů vlnového multiplexu. Nevýhodou je, že všechny vysílače musí být stejně polarizovány [15]. Tato varianta je znázorněna na obr. 5.10.

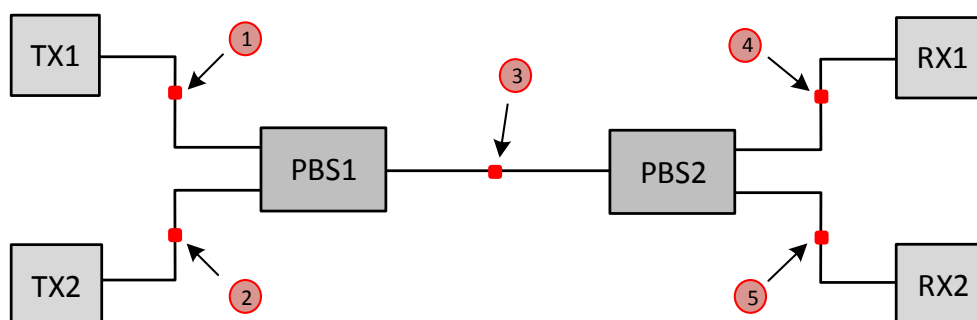


Obr. 5.10: Blokové schéma polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem varianta 2.

6 PRAKTICKÁ REALIZACE POLARIZAČNÍHO MULTIPLEXU

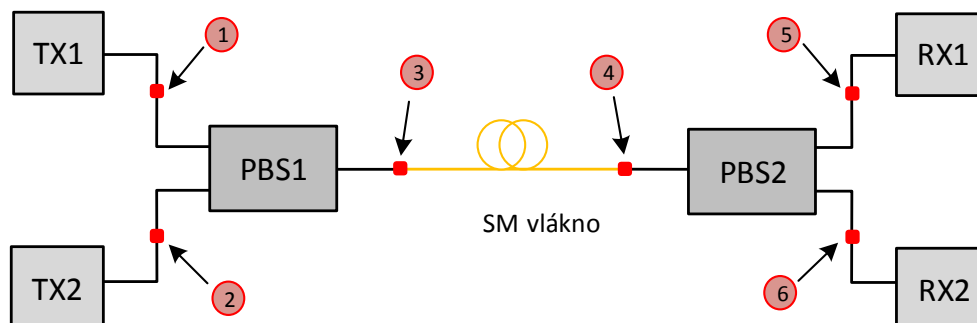
Na základě teoretických podkladů byl realizován praktický návrh a měření přenosového systému založeném na polarizačním multiplexu. Ten se skládal z řady laboratorních měření a finálního funkčního návrhu přenosového kanálu.

Celé pracoviště bylo zapojeno podle obr. 6.1, kde TX1, TX2 jsou vysílače, RX1, RX2 jsou přijímače, PBS1 slučuje dva nezávislé signály z vysílačů do společného vlákna, na druhé straně PBS2 zase signály rozdělí zpět do příslušných přijímačů. Vyznačené body 1-5 určují místa, v kterých bylo provedeno měření. To probíhalo tak, že se spoj v bodě připojil na externí čidlo polarimetru spojeného s počítačem a pomocí programů TXP Polarimetr se zobrazil stav polarizace signálu v daném bodě. Stav polarizace je možné zobrazit na Poincarého kouli nebo v režimu rozsahu. Režim rozsahu umožňuje uložení naměřených dat, z kterých byly zpracovány data v tabulkách. Změřené hodnoty byly zaokrouhleny na jedno desetinné místo.



Obr. 6.1: Blokové schéma zapojení pracoviště.

V dalším měření se mezi polarizační splitty vloží 1 m jednovidového optického vlákna, znázorněné na obr. 6.2. Tím vznikne další bod spoje.



Obr. 6.2: Blokové schéma zapojení pracoviště s vloženým jednovidovým vláknem.

Celé měření pracoviště je ovlivněno přibližně 10 % chybou měření, která je způsobena složitým a nepřesným nastavením lineární vertikální polarizace signálu z vysílačů TX1 a TX2. Stav polarizace se také měnil v průběhu měření, to mohlo být způsobeno nepatrnou změnou polohy SM patchcordů z vysílačů TX1 a TX2, dále to mohlo být způsobeno zahřátím vláken při manipulaci s nimi. Další aspekt ovlivňující přesnost měření byly konektorové spoje v trase, kde jen nepatrná změna utáhnutí změnila polarizační stav světla.

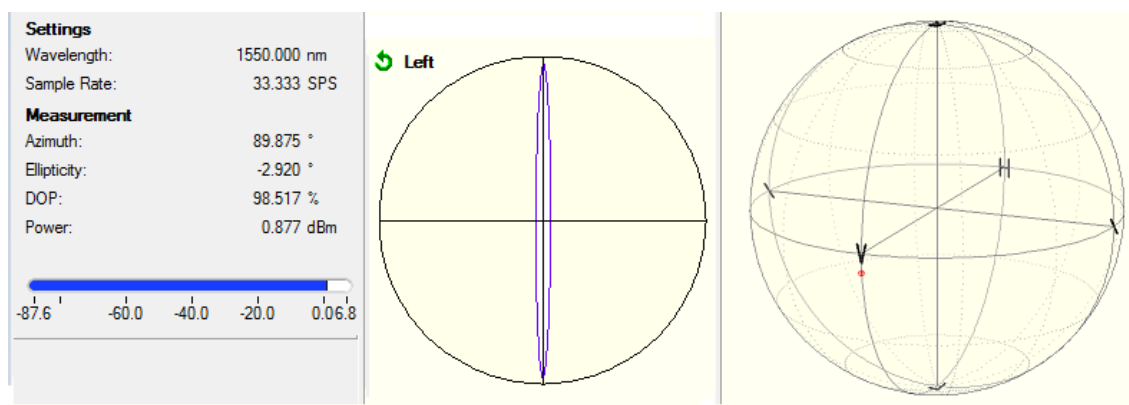
6.1 Měření pracoviště s laserovou diodou jako vysílač

Jako vysílač byla použita laserová dioda LPS-PM15150-FC vyzařující signál o lineárně vertikální polarizaci. Provozní proud LD byl nastaven na 30 mA a teplotní stabilizace 20 °C. Pomocí této LD se zkalibrovalo externí čidlo polarimetru. Změřené hodnoty jsou vyneseny v tab. 6.1, na obr. 6.3 a 6.4 lze vidět stav polarizace na Poincarého kouli a v režimu rozsahu.

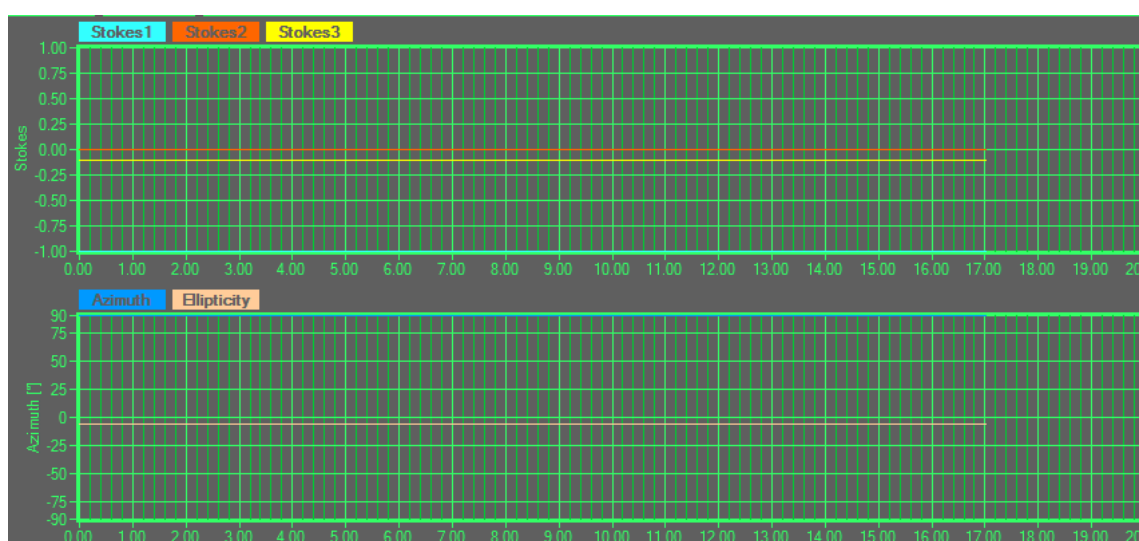
Tab. 6.1: Kalibrace Polarimetru.

Kalibrace	LD	LD + lin. polarizátor
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1, 0 \\ -1, 0 \\ 0, 0 \\ -0, 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1, 0 \\ -1, 0 \\ 0, 0 \\ 0, 0 \end{bmatrix}$
DOP [%]	98,4	98,8
Výkon [dBm]	0,9	0,6

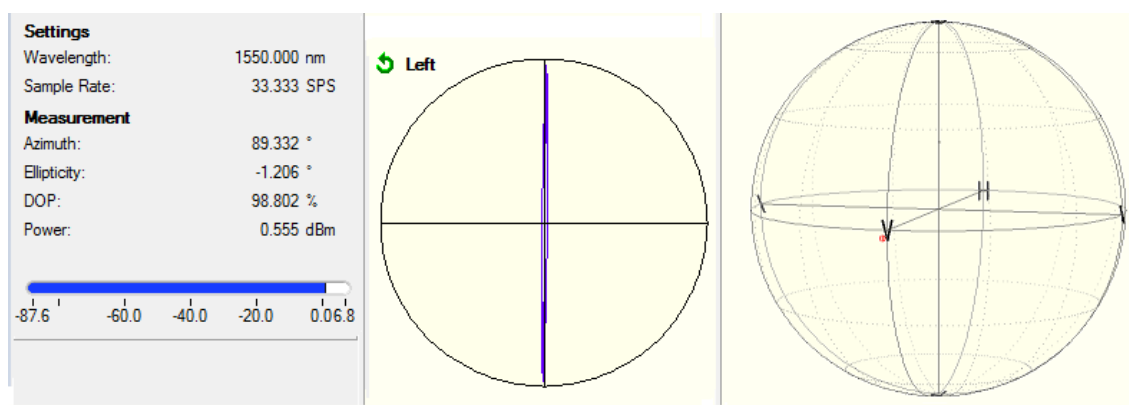
Z tabulky a obrázků je zřejmé, že nešlo o zcela dokonale lineárně vertikální polarizované světlo. Pro lepší zkalibrování se tak mezi polarimetr a LD vložil lineární polarizátor, na obr. 6.5 je zobrazen stav výsledné kalibrace na Poincarého kouli.



Obr. 6.3: Signál LD zobrazený na Poincarého kouli.



Obr. 6.4: Signál LD zobrazený v režimu rozsahu.



Obr. 6.5: Signál z LD a lineárního polarizátoru zobrazený na Poincarého kouli.

V tab. 6.2 jsou uvedeny všechny použité přístroje při kalibraci.

Tab. 6.2: Použité přístroje pro kalibraci.

Přístroj	Typ
Laserová dioda	LPS-PM1550-FC
Lineární polarizátor	ILP1550PM-FC
Polarimetr	PAX5710IR3

6.1.1 Laserová dioda připojena na TX1

Po kalibraci polarimetru se pracoviště zapojilo podle obr. 6.1. LD se použila jako vysílač TX1, vysílač TX2 nebyl zapojen. Následně se celé pracoviště proměřilo. Změřené hodnoty v jednotlivých bodech jsou vyneseny v tab. 6.3.

Tab. 6.3: Měření zapojení s LD připojenou na TX1.

Bod	1	3	4	5
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,0 \\ -0,1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ -0,1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,3 \\ -0,1 \end{bmatrix}$
DOP [%]	98,0	98,7	98,6	98,8
Výkon [dBm]	0,9	0,1	-12,9	-0,6

Vzhledem k vypnutému vysílači TX2 se v PBS1 neslučovaly dva nezávislé signály a vláknem se přenášel pouze jeden lineárně vertikálně polarizovaný signál, tento signál byl z PBS2 přiveden na odpovídající přijímač RX2.

Z tab. 6.3 je zřejmé že se část signálu z TX1 objevila také na přijímači RX1, v tabulce zastoupeným bodem 4.

V příloze B.1 jsou zobrazeny stavy polarizace na Poincarého kouli v jednotlivých bodech zapojení.

6.1.2 Laserová dioda připojena na TX2

Postup měření obdobný jako při předchozím měření s rozdílem, že LD je použita jako vysílač TX2 a vysílač TX1 je nepoužitý. Změřené hodnoty v jednotlivých bodech jsou vyneseny v tab. 6.4

Tab. 6.4: Měření zapojení s LD připojenou na TX2.

Bod	2	3	4	5
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,0 \\ -0,1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,9 \\ -0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,3 \\ -0,1 \end{bmatrix}$
DOP [%]	97,7	89,1	98,4	98,9
Výkon [dBm]	0,9	0,2	-1,1	-12,6

Část signálu z vysílače TX2 se opět objevila na přijímači RX2. Z hodnot Stokesových parametrů je zřejmé, že signál z vysílače TX2 je v PBS1 z lineární vertikální polarizace natočen do lineárně horizontální polarizace a přenášen až k PBS2, kde je znovu natočen do lineárně vertikální polarizace a přiveden na odpovídající přijímač RX1.

V příloze B.2 jsou zobrazeny stavy polarizace na Poincarého kouli v jednotlivých bodech zapojení.

6.1.3 Laserová dioda připojena na TX1 s vloženým jedno- vidovým vláknem

V tomto měření se mezi polarizační splittersy PBS1 a PBS2 vložilo jednovidové optické vlákno o délce 1 m, vlákno bylo po celé své délce napnuto, aby se zabránilo zbytečným ohybům a zkrutům. Zapojení pracoviště zobrazeno na obr. 6.2.

LD je připojena na vysílač TX1, vysílač TX2 je odpojen. S takto zapojeným pracovištěm se provedlo měření v jednotlivých bodech pracoviště, změřené hodnoty jsou vyneseny v tab. 6.5.

Tab. 6.5: Měření zapojení s jednovidovým vláknem pro LD připojenou na TX1.

Bod	1	3	4	5	6
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,0 \\ -0,1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,8 \\ -0,7 \\ -0,4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,3 \\ -0,1 \end{bmatrix}$
DOP [%]	98,0	98,7	28,8	98,3	98,8
Výkon [dBm]	0,9	0,1	-1,8	-2,8	-5,8

Hodnoty změřené v bodech 1 a 3 jsou převzaty z předešlého měření, v kterém nebylo zapojeno jednovidové optické vlákno. Měření se provedlo pro nový bod 4, který se

nachází na konci vloženého jednovidového optického vlákna a před PBS2, v kterém dojde znovu k rozdělení signálů do dvou nezávislých a následně jsou přivedeny na příslušné přijímače RX1 a RX2. Pro tyto body 5 a 6 bylo provedeno měření taktéž.

V příloze B.3 jsou zobrazeny stavy polarizace na Poincarého kouli v jednotlivých bodech zapojení.

6.1.4 Laserová dioda připojena na TX2 s vloženým jedno- vidovým vláknem

Postup měření obdobný jako při předchozím měření s rozdílem, že LD je použita jako vysílač TX2 a vysílač TX1 je nepoužitý.

Změřené hodnoty v jednotlivých bodech jsou vyneseny v tab. 6.6

Tab. 6.6: Měření zapojení s jednovidovým vláknem pro LD připojenou na TX2.

Bod	2	3	4	5	6
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,0 \\ -0,1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,9 \\ -0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -0,5 \\ -0,9 \\ 0,1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,3 \\ -0,1 \end{bmatrix}$
DOP [%]	97,7	89,1	43,5	98,3	98,6
Výkon [dBm]	0,9	0,2	-0,9	-5,5	-2,4

V příloze B.4 jsou zobrazeny stavy polarizace na Poincarého kouli v jednotlivých bodech zapojení.

V tab. 6.7 jsou uvedeny všechny použité komponenty při měření s LD jako vysílačem.

Tab. 6.7: Použité přístroje při měření pracoviště s LD.

Přístroj	Typ
Laserová dioda	LPS-PM1550-FC
Polarizační splitter/combiner	PBC1550PM-FC
Polarimetr	PAX5710IR3
SM optický kabel	CPP-FC-P-FC-P-SS-GD-PVC

6.2 Měření pracoviště s média konvertory

Jako vysílače/přijímače v tomto měření byly použity média konvertory MC220L firmy TP-LINK s SFP modulem TP-LINK TL-SM321.

Média konvertor je síťové zařízení umožňující propojení dvou rozdílných síťových technologií. Umožňuje převod elektrického signálu používající datové kabely na signál optický využívaný v optických sítích. SFP modul je kompaktní vysílač používaný v telekomunikacích a datových komunikacích. Využívá se jako rozhraní mezi síťovými zařízeními a optickými vlákny.

V tab. 6.8 jsou uvedeny všechny použité komponenty při měření. V příloze C jsou veškeré parametry všech použitých komponentů použitých při měření.

Tab. 6.8: Použité přístroje při měření pracoviště s média konvertory.

Přístroj	Typ
Média konvertor	TP-LINK MC220L
SFP modul	TP-LINK TL-SM321
Patchcord optický SM LC-FC	OPA-9-FC/LC-1D-AMP
Polarizační splitter/combiner	PBC1550PM-FC
Polarimetr	PAX5710IR3
SM optický kabel	CPP-FC-P-FC-P-SS-GD-PVC
Polarizační kontrolér	FPC561

6.2.1 Zapojení s média konvertory

Pracoviště bylo zapojeno podle obr. 6.1. Jeden média konvertor slouží jako vysílač TX1 a přijímač RX1, druhý média konvertor je vysílač TX2 a přijímač RX2. Vysílače a přijímače jsou k polarizačnímu děliči připojeny pomocí duplexního patch kabelu o délce 1m LC/FC. Patch kabel je jednovidové optické vlákno, které nezachovává po celé své délce stav polarizace jako vlákna polarizaci zachovávající. Lineárně vertikální polarizace na konci patch kabelu byla docílena ohyby a deformací kabelu. Kabel se ohýbal a deformoval dokud na jeho výstupu nebylo co nejlépe lineárně vertikálně polarizované světlo, následně se kabel v této podobě co nejopatrněji přichytil izolepou k podložce a k distančním sloupkům, aby nedošlo k jeho pohybu a tím i změně stavu polarizace. Zbytek zapojení pracoviště je identický jako v předešlých úlohách.

Změřené hodnoty jsou vyneseny v tab. 6.9.

V příloze B.5 jsou zobrazeny stavy polarizace na Poincarého kouli v jednotlivých bodech zapojení.

Tab. 6.9: Měření zapojení s média konvertory.

Bod	1	2	3	4	5
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,1 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,1 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,3 \\ 0,8 \\ 0,5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,1 \\ -0,1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$
DOP [%]	98,5	99,1	10,9	98,8	98,6
Výkon [dBm]	-0,5	-0,4	2,1	-1,2	-1,7

6.2.2 Zapojení s média konvertory a vloženým jednovidovým vláknem

Jako u předešlého měření s LD jako vysílačem tak i v tomto měření se mezi splittersy vložilo jednovidové optické vlákno o délce 1 m. Zapojení pracoviště podle obr. 6.2.

Veškeré naměřené hodnoty jsou vyneseny v tab. 6.10.

Tab. 6.10: Měření zapojení s jednovidovým vláknem pro média konvertory.

Bod	1	2	3	4	5	6
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,1 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,1 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,3 \\ 0,8 \\ 0,5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -0,1 \\ -1,0 \\ -0,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,1 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ 0,0 \end{bmatrix}$
DOP [%]	98,5	99,1	10,9	92,1	98,3	98,6
Výkon [dBm]	-0,5	-0,4	2,1	1,2	-1,4	-2,1

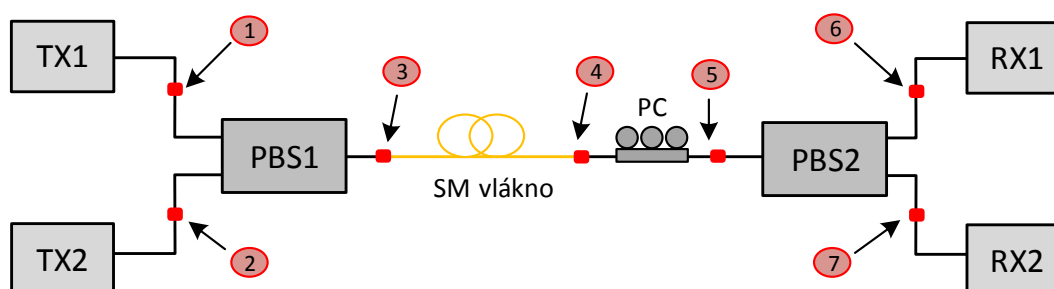
V příloze B.6 jsou zobrazeny stavy polarizace na Poincarého kouli v jednotlivých bodech zapojení.

Po proměření pracoviště se signál z TX1 navázal rovnou do jednovidového optického vlákna a změřila se změna stavu polarizace. V tab. 6.11 je uvedena polarizace před a za jednovidovým optickým kabelem.

Z tabulky je zřejmé, že před vstupem světla do jednovidového vlákna byla polarizace světla LVP a průchodem skrze vlákno se změnila. Na výstupu se objevila polarizace blížící se L+45P, změnu stavu polarizace na Poincarého kouli si lze prohlédnout v příloze B.7. Právě kvůli měnícímu se stavu polarizace světla při průchodu jednovidovým optickým kabelem byl do zapojení zobrazeném na obr. 6.2 přidán před PBS2 polarizační kontrolér PC. Nové zapojení pracoviště znázorněno na obr. 6.6.

Tab. 6.11: Změna stavu polarizace po průchodu jednovlákenného optického kabelu 1 m.

Bod	Před SM vláknem	Za SM vláknem
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -0,1 \\ 1,0 \\ -0,3 \end{bmatrix}$
DOP [%]	98,1	98,4
Výkon [dBm]	-0,7	-1,9



Obr. 6.6: Blokové schéma zapojení pracoviště s vloženým jednovlákenným vláknem a polarizačním kontrolérem.

Za pomoci přidaného polarizačního kontroleru je možné na konci jednovlákenného vlákna nastavit požadovaný stav polarizace. Světlo s touto polarizací následně vstupuje do PBS2, kde je rozděleno a přivedeno na odpovídající přijímače RX1 a RX2. Změřené hodnoty pro toto zapojení jsou uvedeny v tab. 6.12.

Tab. 6.12: Měření zapojení s jednovlákenným vláknem a polarizačním kontrolérem pro média konvertory.

Bod	1	2	3	4	5	6	7
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,1 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,0 \\ 0,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,6 \\ -0,1 \\ 0,8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,4 \\ 0,9 \\ -0,2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -0,1 \\ 0,1 \\ 1,0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ -0,1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ -1,0 \\ 0,2 \\ -0,1 \end{bmatrix}$
DOP [%]	97,9	98,4	12,9	48,6	81,9	98,0	98,9
Výkon [dBm]	-0,4	-0,4	2,1	1,5	-5,6	-9,0	-8,3

6.2.3 Funkční pracoviště polarizačního multiplexu pro vlnovou délku 1550 nm

Pracoviště bylo zapojeno podle zapojení zobrazeném na obr. 6.6 s tím, že do bodu 5 byl vložen dělič optického výkonu PMC1550P-90B-FC, který rozděloval v poměru 90/10, 90 % výkonu bylo navázáno do PBS2 a zbylých 10 % bylo přivedeno na externí čidlo polarimetru. Stav polarizace signálu zobrazen pomocí polarimetru je vyneseno v tab. 6.13.

Před ověřením funkčnosti pracoviště se nejdříve na vysílač TX1 připojilo jedno-
vidové vlákno, za ním byl připojen polarizační kontrolér a po něm dělič optického výkonu, připojený na polarimetr. Světlo z TX1 bylo lineárně vertikálně polarizováno a průchodem jednovidovým vláknem došlo ke změně stavu polarizace. Pomocí vloženého polarizačního kontroleru se světlo na konci jednovidového vlákna znovu natočilo do lineární vertikální polarizace. Poté se celé pracoviště zapojilo podle obr. 6.6. Jednovidovým vláknem a polarizačním kontrolérem se už nemanipulovalo, aby nedošlo ke změně stavu polarizace.

Do takto zapojeného a připraveného pracoviště se na port RJ45 média konvertorů připojili pomocí síťového kabelu kat. 5 dva notebooky.

Pro ověření funkčnosti pracoviště se v příkazovém řádku využil příkaz `-ping` na protější notebook. Při funkčnosti pracoviště se obdrží odpovědi od protistrany, délka zpoždění (latence) a na závěr statický souhrn.

Tab. 6.13: Stav polarizace na konci SM vlákna různé délky.

Délka SM vlákna [m]	1	10	2000	2000
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,9 \\ 0,2 \\ -0,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,4 \\ 0,3 \\ -0,8 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,8 \\ 0,6 \\ 0,2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,4 \\ -0,8 \\ 0,4 \end{bmatrix}$
DOP [%]	39,3	59,1	66,7	47,0
Výkon [dBm]	-15,0	-15,4	-21,9	-22,3

V příloze B.9 je zobrazen stavy polarizace za SM vláknem na Poincarého kouli.

Funkčnost pracoviště byla nejdříve ověřena s vloženým jednovidovým vláknem délky 1 m. Poté se vyměnilo za vlákno o délce 10 m a nakonec se zapojilo vlákno o délce 2000 m, což bylo nejdelší vlákno k dispozici, bylo natočené na cívku, která byla do zapojení připojena za pomoci patchcordu SM E2000-FC. Celková trasa skládající se z jednovidového vlákna, patchcordů a polarizačního kontroleru (bod 3 až 5 v blokovém schématu 6.6) byla 2006 m.

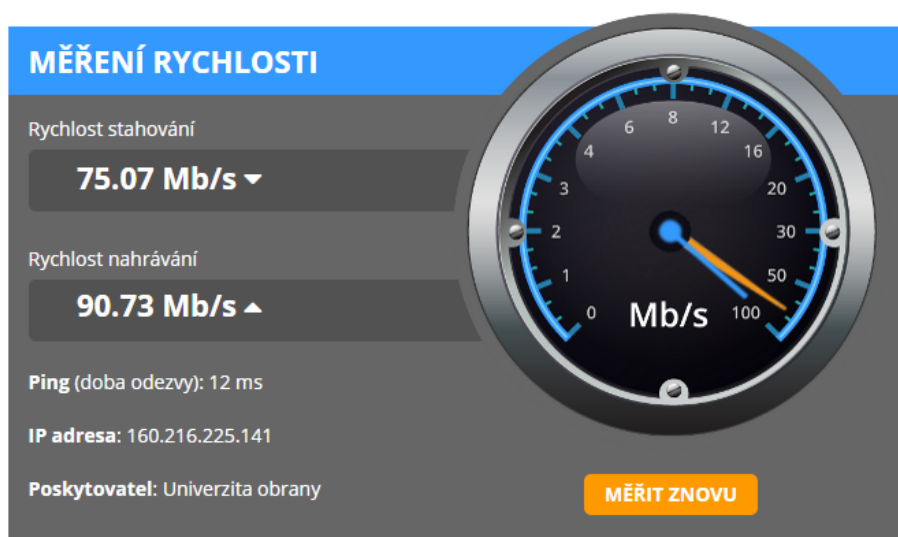
Pro pracoviště s vloženým 2000 m dlouhým jednovlákenným vlákem byla funkčnost ověřena ještě s připojením jednoho média konvertoru na router (port RJ45 10/100Mb/s) síť Univerzity obrany v tab. 6.13 reprezentovaným čtvrtým sloupkem, první tři sloupky jsou se zapojenými notebooky. Pro pracoviště zapojené do sítě bylo provedeno také měření rychlosti stahování a nahrávání, rychlost byla limitována routem jenž podporoval max. rychlost 100Mb/s. Měření bylo provedeno na adrese www.dsl.cz/test-mereni-rychlosti výsledek je zobrazen na obr. 6.8 a na obr. 6.7 je zobrazen příkaz `-ping` na www.seznam.cz.

```
C:\Users\TKP User>ping www.seznam.cz

Pinging www.seznam.cz [77.75.79.53] with 32 bytes of data:
Reply from 77.75.79.53: bytes=32 time=5ms TTL=252
Reply from 77.75.79.53: bytes=32 time=4ms TTL=252
Reply from 77.75.79.53: bytes=32 time=4ms TTL=252
Reply from 77.75.79.53: bytes=32 time=5ms TTL=252

Ping statistics for 77.75.79.53:
    Packets: Sent = 4, Received = 4, Lost = 0 (0% loss),
    Approximate round trip times in milli-seconds:
        Minimum = 4ms, Maximum = 5ms, Average = 4ms
```

Obr. 6.7: Ověření funkčnosti pracoviště pomocí příkazu `ping` v příkazovém řádku.



Obr. 6.8: Měření rychlosti stahování a nahrávání u funkčního pracoviště.

Tab. 6.14: Použité přístroje u funkčního pracoviště polarizačního multiplexu.

Přístroj	Typ
Média konvertor	TP-LINK MC220L
SFP modul	TP-LINK TL-SM321
Patchcord optický SM LC-FC	OPA-9-FC/LC-1D-AMP
Polarizační splitter/combiner	PBC1550PM-FC
SM optický kabel	CPP-FC-P-FC-P-SS-GD-PVC
Patchcord optický SM E2000-FC	E2AFC-9-S20-YW-2M0
Polarizační kontrolér	FPC561
Dělič optického výkonu	PMC1550-90B-FC
Polarimetr	PAX5710IR3

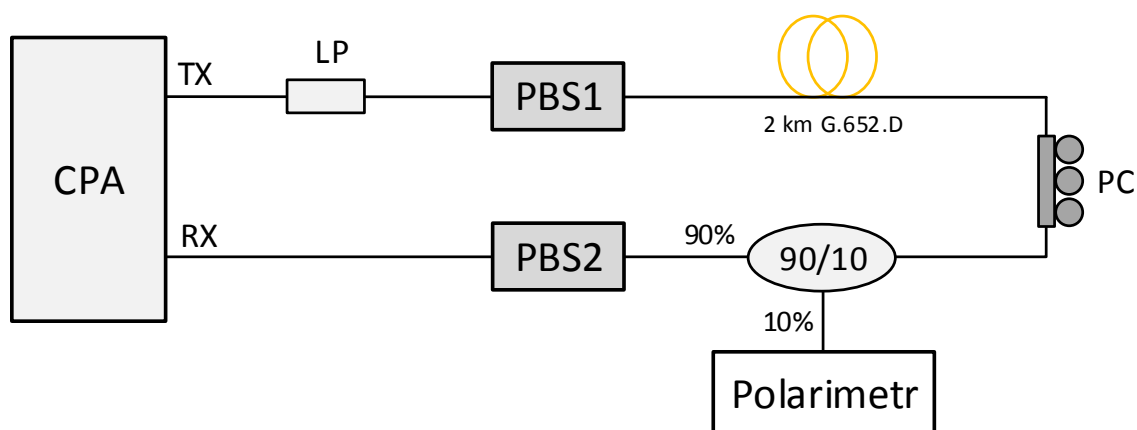
6.3 Měření bitové chybovosti

Bitová chybovost je hlavní ukazatel kvality optických systémů a je definována poměrem chybně přijatých bitů bE ku celkovému počtu přijatých bitů p za dobu t .

$$BER = \frac{bE}{vp \cdot t}, \quad (6.1)$$

kde v je přenosová rychlost [21].

Pracoviště bylo zapojeno podle obr. 6.9.



Obr. 6.9: Blokové schéma zapojení pracoviště s analyzátozem výkonnosti komunikace.

Analyzátor výkonnosti komunikace (CPA) sloužil jako vysílač a přijímač zároveň. Mezi jeho vysílač (TX) a polarizační splitter (PBS1) byl vložen lineární polarizátor (LP) k natočení světla do lineární vertikální polohy (LVP). V PBS1 došlo k otočení

světla do lineární horizontální polohy (LHP) a v této polarizaci bylo světlo přenášeno 2 km dlouhým jednovidovým optickým kabelem. Na konci kabelu byl připojen polarizační kontrolér (PC) a za ním dělič optického výkonu s dělicím poměrem 90/10, kde 90 % výkonu bylo navázáno zpět do trasy a přivedeno na druhý polarizační dělič (PBS2), z kterého světlo pokračovalo do přijímače (RX). Zbýlých 10 % výkonu bylo přivedeno na polarimetr, který zobrazoval stav polarizace za jednovidovým kabelem na Poincarého kouli a tak umožnil natáčením fázových destiček polarizačního kontroléru k nastavení lineární horizontální polarizaci světla, která byla změněna průchodem jednovidové trasy.

Nastavení parametrů přenosu na vysílači je zobrazeno na obr. 6.10. Byla zvolena maximální podporovaná přenosová rychlost 140 Mb/s.



Obr. 6.10: Nastavení vysílače na analyzátoru výkonnosti komunikace.

Při připojení dalšího signálu z média konvertoru na PBS1 a z PBS2 přivedení signálu na přijímač druhého média konvertoru bylo celé pracoviště funkční, ale analyzátor výkonnosti komunikace nebyl schopen měřit bitovou chybovost. Proto pro toto měření nedocházelo k polarizační multiplexaci dvou signálů, ale celým zapojením byl přenášén pouze signál z analyzátoru výkonnosti komunikace.

Pokud na výstupu z jednovidového kabelu bylo světlo v lineární horizontální poloze, tak změřená bitová chybovost byla 0.

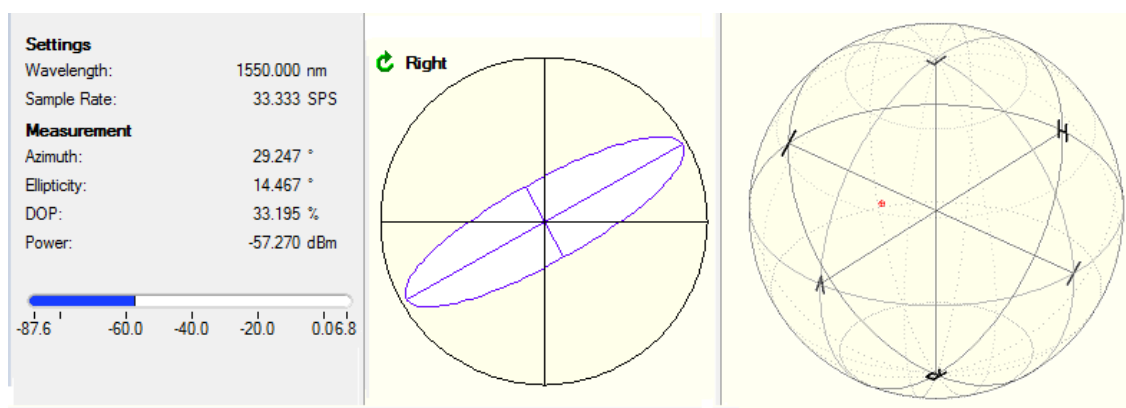
Poté se manipulovalo pouze s první fázovou destičkou (QWP) polarizačního kontroléru do stavu kdy bitová chybovost nebyla 0. Takto nastavené pracoviště se nechalo pár minut proměřit. Poté se opět polarizace za jednovidovým kabelem nastavila do lineární horizontální podoby a manipulovalo se s druhou fázovou destičkou (HWP) a na konec s třetí fázovou destičkou (QWP).

Stokesův vektor při kterém došlo k bitové chybovosti a bitová chybovost pro jednotlivé fázové destičky je uvedena v tab. 6.15. Z tabulky je zřejmé, že i při maximálním vychýlení třetí fázové destičky nedošlo k bitové chybovosti.

Tab. 6.15: Stokesovi vektory a BER při manipulaci s polarizačním kontrolérem.

Fázová destička	1	2	3
Stokesův vektor	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,8 \\ 0,4 \\ 0,5 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,9 \\ 0,2 \\ 0,3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1,0 \\ 0,7 \\ -0,2 \\ 0,6 \end{bmatrix}$
BER [-]	1,72E-08	1,29E-07	0

Na obr. 6.11 je zobrazen stav polarizace na Poincarého kouli, při které už docházelo k bitové chybovosti a obr. 6.12 zobrazuje změřenou bitovou chybovost analyzátozem výkonnosti komunikace. Oba obrázky jsou pro manipulaci s první fázovou destičkou polarizačního kontroléru.



Obr. 6.11: Stav polarizace na Poincarého kouli při vychýlení první fázové destičky polarizačního kontroléru do chybovosti.



Obr. 6.12: Chybovost BER zobrazená na analyzátoru výkonnosti komunikace při první fázové destičky polarizačního kontroléru.

Tab. 6.16: Použité přístroje při měření bitové chybovosti.

Přístroj	Typ
Analyzátor výkonnosti komunikace	HP 37717C
Lineární polarizátor	ILP1550PM-FC
Polarizační splitter/combiner	PBC1550PM-FC
Patchcord optický SM E2000-FC	E2AFC-9-S20-YW-2M0
SM optický kabel	CPP-FC-P-FC-P-SS-GD-PVC
Polarizační kontrolér	FPC561
Dělič optického výkonu	PMC1550-90B-FC
Polarimetr	PAX5710IR3

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývá analýzou způsobu šíření světla optickým vláknem dvěma polarizačními rovinami a to s důrazem na jejich matematický popis pomocí Jonesových a Stokesových vektorů a způsoby zobrazení okamžitého stavu polarizovaného světla na Poincarého kouli. Cílem práce byla realizace funkčního polarizačního multiplexu pro vlnovou délku 1550 nm.

Teoretická část práce poskytuje přehled v problematice polarizačního multiplexu a slouží k jejímu pochopení, které je nezbytné při realizaci funkčního pracoviště.

První kapitola se zabývá polarizací světla, jeho typy a způsoby, kterými získáme lineárně polarizované světlo.

V druhé kapitole jsou probrány matematické popisy polarizovaného světla za pomoci Stokesových a Jonesových vektorů a jejich vzájemný převod. V této kapitole je také popsána Poincarého koule, jenž slouží k zobrazení stavu polarizovaného světla.

Třetí kapitola byla věnována přenosu signálu v optických systémech. Dozvíme se v ní o speciálních optických vláknech tzv. polarizaci zachovávajících (PM). Právě tyto vlákna jsou nedílnou součástí pro funkční polarizační multiplex, umožňují totiž přenos světla dvěma polarizačními rovinami a to v nepozměněné podobě po celé své délce. V kapitole je také uveden princip polarizačního multiplexu.

Navazující čtvrtá kapitola se zabývá možným využitím polarizačního multiplexu.

Teoretické předpoklady pro správné funkční zapojení polarizačního multiplexu jsou uvedeny v páté kapitole, která se také podrobněji zabývá dvojlomem v jednovidových vláknech. V jejím závěru jsou popsány dva možné způsoby kombinace polarizačního multiplexu s vlnovým multiplexem.

Praktická část diplomové práce byla rozdělena do tří podkapitol kapitoly šest. V kapitole šest se na základě teoretických podkladů realizoval praktický návrh pracoviště, ten se skládal z řady laboratorních měření, finálního funkčního polarizačního multiplexu pro vlnovou délku 1550 nm a z pracoviště pro měření bitové chybovosti.

V první podkapitole bylo měřeno pracoviště s laserovou diodou použitou jako vysílač. Nejdříve se LD připojila na jeden z vysílačů a proměřilo se celé pracoviště. Poté se LD přepojila na druhý vysílač a znovu se celé pracoviště proměřilo. Následně se do celého pracoviště mezi oba polarizační splittery PBS1 a PBS2 vložilo jednovidové optické vlákno o délce 1 m a znovu se provedly dvě měření pro zapojení s LD na vysílač TX1 a TX2.

V druhé podkapitole bylo měřeno pracoviště s média konvertory. Nejdříve se celé pracoviště proměřilo bez vloženého jednovidového vlákna a následně s vloženým 1 m dlouhým jednovidovým vláknem. V důsledku změny stavu polarizace světla průchodem jednovidovým vláknem byl do zapojení přidán polarizační kontrolér, pomocí něhož se výstup z jednovidového vlákna nastavil požadovaný stav polarizace.

Za polarizační kontrolér se vložil dělič optického výkonu, který rozděloval v poměru 90/10, 90% výkonu bylo navázáno zpět do PBS2 a zbylých 10% bylo přivedeno na externí čidlo polarimetru.

V závěru této podkapitoly se na oba média kontertory pomocí síťového kabelu kat. 5 připojily dva notebooky a ověřila se funkčnost polarizačního multiplexu bez vloženého jednovidového vlákna. Pro ověření funkčnosti pracoviště se v příkazovém řádku využil příkaz `-ping` na protější notebook. Při funkčnosti pracoviště se obdrží kladná odpověď od protistrany.

Po ověření funkčnosti se do pracoviště vložilo jednovidové vlákno různé délky (od 1 m do 2000 m) a ověřila se funkčnost polarizačního multiplexu s vloženým jednovidovým vlákem. Pracoviště bylo zcela funkční i při vložení 2000 m dlouhého jednovidového vlákna. Při tomto zapojení se jeden z notebooků připojil do internetové sítě Univerzity obrany a provedlo se měření rychlosti stahování a nahrávání. Rychlost stahování byla 75 Mbs a rychlost nahrávání 90 Mbs.

Poslední podkapitola kapitoly šest byla věnována měření bitové chybovosti. Při polarizační multiplexaci dvou signálů analyzátor výkonnosti komunikace nebyl schopen pracovat. Proto se zdroj druhého signálu odpojil a celým pracovištěm procházel pouze signál z analyzátoru výkonnosti komunikace. Následně se manipulovalo s jednotlivými fázovými destičkami polarizačního kontroléru až do stavu kdy došlo k chybnému přenosu. Stav Stokesova vektoru spolu s bitovou chybovostí se pro jednotlivé fázové destičky zapsal. Při čemž i při maximálním vychýlení třetí fázové destičky byla bitová chybovost 0.

Ze všech naměřených hodnot byly sestaveny tabulky a v příloze jsou uvedeny obrázky zobrazující stav polarizace na Poincarého kouli v jednotlivých bodech zapojení. Dále jsou v příloze uvedeny parametry všech použitých přístrojů a komponentů při měření a fotografie pracoviště.

V práci se dá dále pokračovat. Do pracoviště by se mohlo vložit jednovidové vlákno delší než 2000 m a ověřit při jaké délce dojde k výpadku komunikace. Při zakoupení dalších dvou média konvertorů se může pracoviště přepojit do zapojení se čtyřmi média konvertory. Při připojení notebooků na porty RJ45 by se dala ověřit funkčnost pracoviště až mezi čtyřmi účastníky přes jeden přenosový kanál. Dále by se pomocí polarizačního kontroléru mohl měnit stav polarizace světla na konci jednovidového vlákna a zkoumat při kterém stavu polarizace bude komunikace funkční a při kterém již zcela vypadne.

Díky této práci jsem se seznámil s problematikou polarizačního multiplexu. Zavedení polarizační multiplex nevyžaduje zásah do distribuční části optické přístupové sítě a jeví se jako jedna z nejlepších technologií pro co nejefektivnější využití stávajících sítí.

LITERATURA

- [1] COLLET, E. *Field guide to polarization*, SPIE Vol. FG05, 2005, ISBN 9780819458681.
- [2] FUKA, J., HAVELKA, B.: *Optika – fyzikální kompendium pro vysoké školy, IV. díl*, Státní pedagogické nakladatelství, Praha 1961.
- [3] KUMAR, A., GHATAK, A.: *Polarized of Light with Applications in Optical Fibers*, Wash.: SPIE, 227p. Tutorial texts in optical engineering, v. TT 90. ISBN 0819482153.
- [4] PELANT I., FIALA J., POSPÍŠIL J., FÄHNRIK J.: *Fyzikální praktikum III. Optika. 1*. Univerzita Karlova, Praha 1993.
- [5] HECHT E.: *Optics* 2nd ed., Addison Wesley 1990. ISBN 020111609X.
- [6] GOLDSTEIN, D.: *Polarized light: Second Edition, Revised And Expanded*. Basel: Marcel Dekker AG, 2003. 654 s. ISBN 0-8247-4053-X.
- [7] BORN, M. WOLF, M.: *Principles of Optics*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 952 s. ISBN 0-521-64222-1.
- [8] MAGNUSSON, R.: *Mueller matrix ellipsometry studies of nanostructured materials* Department of Physics, Chemistry and Biology (IFM) Linköping University, Sweden, Linköping 2014.
- [9] SALEH, B. E. A. TEICH, M. C.: *Základy fotoniky II = Fundamentals of photonics*. Vyd. 1. Praha: Matfyzpress, 1994-1996. 4 sv. ISBN 80-85863-01-4
- [10] WUILPART, M.: *Concept of light polarization. In Trends in photonics and optoelectronics*, ExCOM, VŠB-TUO, 2015, s. 1–43.
- [11] BŘEZINA, V.: *Automatizované měření polarizačních vlastností optického svazku* Brno, 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav Radioelektroniky.
- [12] HALAGAČKA, L.: *Spektroskopická elipsometrie a metoda efektivního prostředí* Ostrava, 2008. Bakalářská práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra aplikované matematiky.
- [13] *Internetové stránky fiberoptics4sale.com* [online] [cit. 7.12.2016] Dostupné z URL: <<https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95042886-what-is-birefringence-and-beat-length>>.

- [14] *Internetové stránky Thorlabs* [online] [cit. 12. 4. 2017] Dostupné z URL: <<https://www.thorlabs.com>>.
- [15] ŠIFTA R.: *Kvalita služeb v optických přístupových sítích: dizertační práce* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 143 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Miloslav Filka, CSc.
- [16] I. SHRIBAK, Michal, Victor L. KOLPASHCHNIKOV, Oleg G. MARTY-NENKO: *Fiber Optic Sensor of Linear Displacement* roč. 1996
- [17] *Internetové stránky newport.com* [online] [cit. 19. 1. 2017] Dostupné z URL: <<https://www.newport.com/t/polarization-in-fiber-optics>>.
- [18] X. Yao, L. Yan, B. Zhang, A. Willner, J. Jiang: *All-optic scheme for automatic polarization division demultiplexing*. Opt. Express 15, 7407-7414 (2007).
- [19] Wikipedia contributors *Circular polarization* Datum poslední revize 21. 03. 2017, 16:54 UTC, [cit. 24. 4. 2017]. Dostupné z URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Circular_polarization>.
- [20] CHIN-LIN CHEN: *Foundations for Guided-Wave Optics* John Wiley & Sons, 2006. 462s. ISBN 9780470042212.
- [21] Malhotra, J. S.; Kumar, M.: *Performance analysis of NRZ, RZ, CRZ and CSRZ data formats in 10Gb/s optical soliton transmission link under the impact of chirp and TOD*. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, ročník 121, č. 9, 2010: s. 800–807.
- [22] *Internetové stránky tp-link* [online] [cit. 14. 4. 2017] Dostupné z URL: <<http://cz.tp-link.com/>>.
- [23] *Internetové stránky Cozlink* [online] [cit. 14. 4. 2017] Dostupné z URL: <<https://www.cozlink.com/>>.
- [24] *Internetové stránky Keysight technologies* [online] [cit. 2. 5. 2017] Dostupné z URL: <<http://www.keysight.com/>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BER	(Bit Error Rate)	Bitová chybovost
CPA	(Communications Performance Analyzer)	Analyzátor výkonnosti komunikace
DOP	(Degree of Polarization)	Stupeň polarizace
DGD	(Differential Group Delay)	Rozdílné skupinové spoždění
FC	(Ferrule Connector)	Konektor typu FC
HWP	(Half-Wave Plate)	Půlvlnná destička
LC	(Lucent Connector)	Konektor typu LC
LCP	(Left Circularly Polarized Light)	Levotočivě polarizované světlo
LD	(Laser Diode)	Laserová dioda
LHP	(Linearly Horizontal Polarized Light)	Lineárně horizontálně polarizované světlo
LP	(Linear Polarizer)	Lineární polarizátor
LVP	(Linearly Vertical Polarized Light)	Lineárně vertikálně polarizované světlo
L+45P	(Linearly +45° Polarized Light)	Lineárně +45° polarizované světlo
L-45P	(Linearly -45° Polarized Light)	Lineárně -45° polarizované světlo
OSA	(Optical Spectrum Analyzer)	Optický spektrální analyzátor
PBC	(Polarization Beam Combiner)	Polarizační slučovač
PBS	(Polarization Beam Splitter)	Polarizační dělič
PD	(Photodetector)	Fotodetektor
PC	(Polarization Controller)	Polarizační kontrolér
PM	(Polarization Maintaining)	Polarizaci zachovávající
POL-MUX	(Polarization Multiplexing)	Polarizační multiplex

QWP	(Quarter Wave Plates)	Čtyřvlákná destička
RCP	(Right Circular Polarized Light)	Pravotočivě polarizované světlo
RX	(Receiver)	Přijímač
SFP	(Small Form-factor Pluggable)	SFP modul
SM	(Single Mode)	Jednovídné
SOP	(States of Polarization)	Stavy polarizace
TX	(Transmitter)	Vysílač
B	Vektor magnetické indukce	
E	Vektor elektrické intenzity	
I	Intenzita světla	
J	Jonesova matice	
M	Mullerova matice	
n	Index lomu	
P	Optický výkon	
S_0, S_1, S_2, S_3	Stokesovy parametry	
$S_{0N}, S_{1N}, S_{2N}, S_{3N}$	Normované Stokesovy parametry	
S	Stokesův vektor	
V	Jonesův vektor	

SEZNAM PŘÍLOH

A	Ověření matematických vzorců	74
A.1	Převod mezi Stokesovým a Jonesovým vektorem	74
A.2	Změna stavu polarizace za pomoci vlnové destičky	75
B	Stavy polarizace zobrazeny na Poincarého kouli	76
B.1	Stavy polarizace pro LD připojenou na TX1	76
B.2	Stavy polarizace pro LD připojenou na TX2	77
B.3	Stavy polarizace pro LD připojenou na TX1 a s vloženým SM vláknem	79
B.4	Stavy polarizace pro LD připojenou na TX2 a s vloženým SM vláknem	80
B.5	Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory	82
B.6	Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem	84
B.7	Změna Stavů polarizace v SM vlákne	85
B.8	Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory, vloženým SM vlák- nem a polarizačním kontrolérem	86
B.9	Stav polarizace za SM vláknem u funkčního pracoviště	89
C	Parametry použitých komponentů	91
C.1	Laserová dioda LPS-PM1550-FC	91
C.2	Lineární polarizátor ILP1550PM-FC	92
C.3	Polarimetr PAX5710IR3	93
C.4	Média konvertor TP-LINK MC220L	94
C.5	SFP modul TP-LINK TL-SM321	95
C.6	Polarizační PM splitter/combiner PBC1550PM-FC	96
C.7	Patchcord optický SM LC-FC	97
C.8	Jednovidový optický kabel Cozlink	98
C.9	Patchcord optický SM E2000-FC	99
C.10	Polarizační kontrolér FPC561	100
C.11	Dělič optického výkonu PMC1550P-90B-FC	101
C.12	Analyzátor výkonnosti komunikace HP 37717C	102
D	Fotografie pracoviště	103
E	OBSAH DVD	106

A OVĚŘENÍ MATEMATICKÝCH VZORCŮ

A.1 Převod mezi Stokesovým a Jonesovým vektorem

Důkaz o vzájemném převodu mezi Stokesovým a Jonesovým převodem pro RCP.

$$\mathbf{S}_{\text{RCP}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{V}_{\text{RCP}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$$

Převod Stokesova vektoru na vektor Jonesův:

$$E_{0x} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} + S_1 \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{0^2 + 0^2 + 1^2} + 0 \right)} = 0,70710678 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$E_{0y} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} - S_1 \right)} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{0^2 + 0^2 + 1^2} - 0 \right)} = 0,70710678 = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\delta = \delta_y - \delta_x = \pm \arctg \left(\frac{S_3}{S_2} \right) = \pm \arctg \left(\frac{1}{0} \right) = \pm \arctg(\infty) = \pm 1,56$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} E_{0x} \exp(0i) \\ E_{0y} \exp(\delta i) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} \exp(0i) \\ \exp(1,56i) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix}$$

Zpětný převod z Jonesova vektoru na vektor Stokesův:

$$S_0 = |E_{0x}|^2 + |E_{0y}|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 + \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = 1$$

$$S_1 = |E_{0x}|^2 - |E_{0y}|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 - \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = 0$$

$$S_2 = 2|E_{0x}| \cdot |E_{0y}| \cdot \cos \delta = 2 \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right| \cdot \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right| \cdot \cos 90^\circ = 0$$

$$S_3 = 2|E_{0x}| \cdot |E_{0y}| \cdot \sin \delta = 2 \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right| \cdot \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right| \cdot \sin 90^\circ = 1$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

A.2 Změna stavu polarizace za pomoci vlnové destičky

Dopadající paprsek o lineárně horizontální polarizaci (LHP):

$$\mathbf{S}_{\text{LHP}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

dopadá na čtvrtvlnnou destičku reprezentující Muellerovou maticí $+45^\circ$ s jeho rychlou osou:

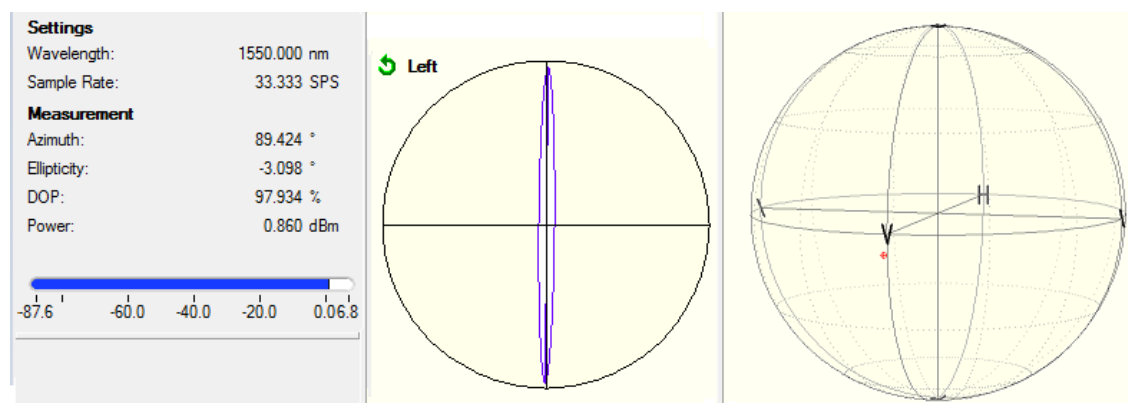
$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Po průchodu světla vlnovou destičkou dostáváme Kruhově pravotočivé polarizované světlo.

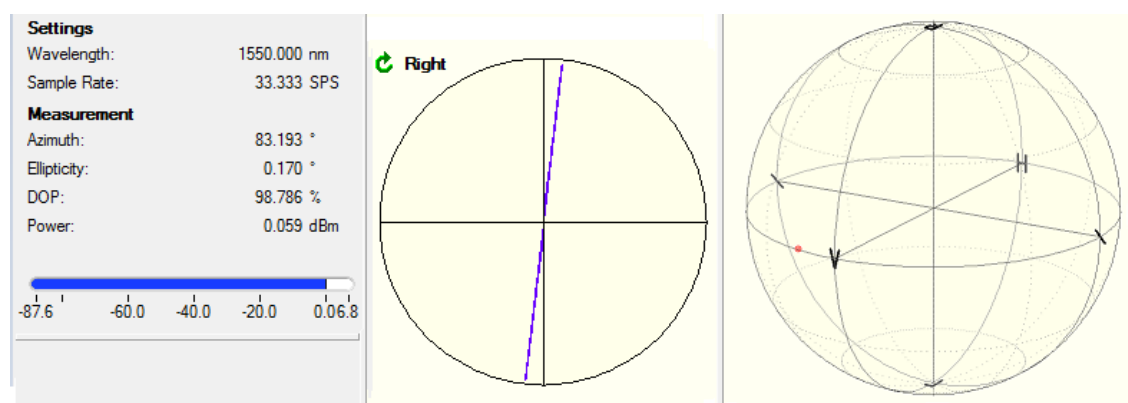
$$\mathbf{S}_{\text{RCP}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

B STAVY POLARIZACE ZOBRAZENY NA POINCARÉHO KOULI

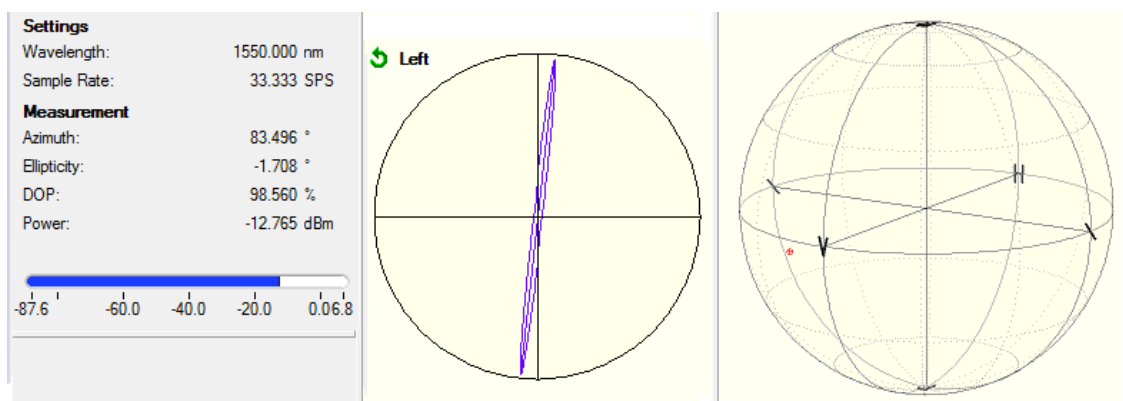
B.1 Stav polarizace pro LD připojenou na TX1



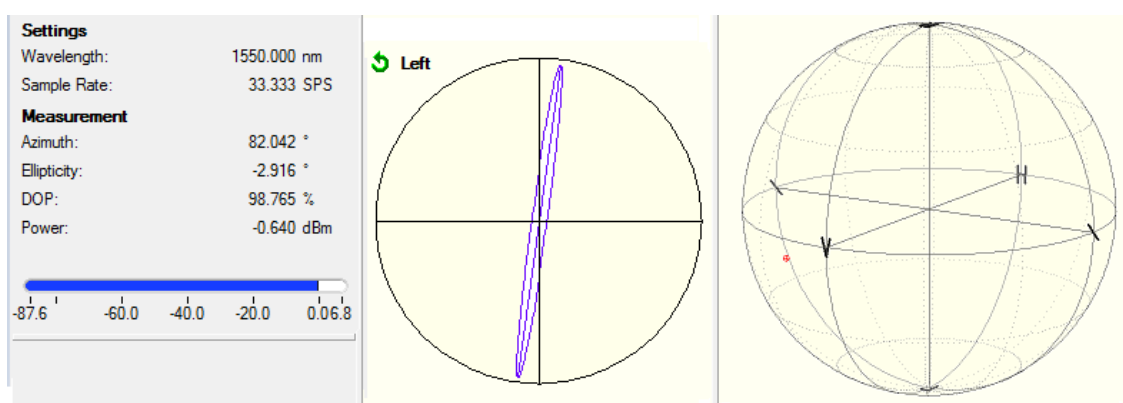
Obr. B.1: Stav polarizace v bodě 1 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1.



Obr. B.2: Stav polarizace v bodě 3 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1.

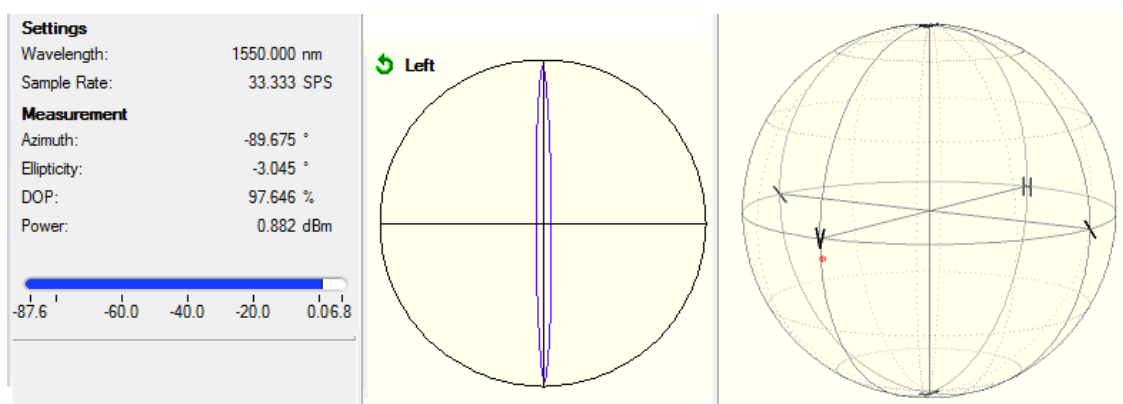


Obr. B.3: Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1.

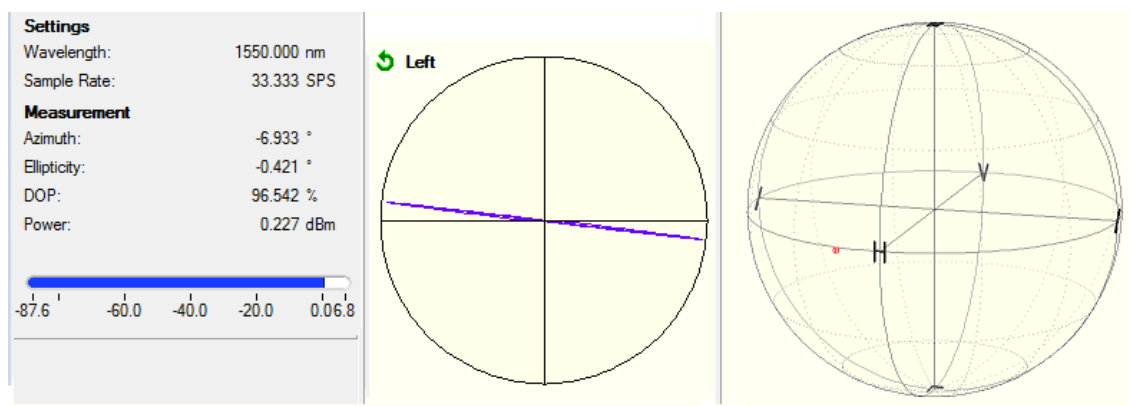


Obr. B.4: Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1.

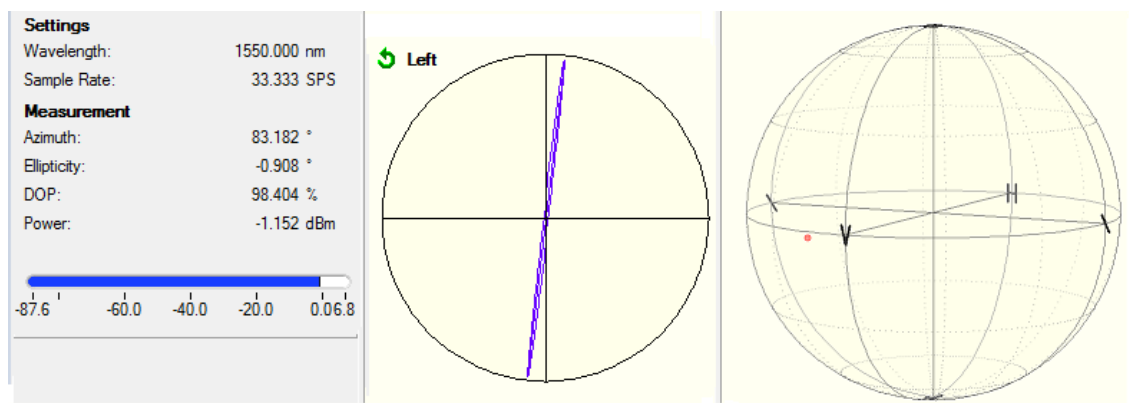
B.2 Stavy polarizace pro LD připojenou na TX2



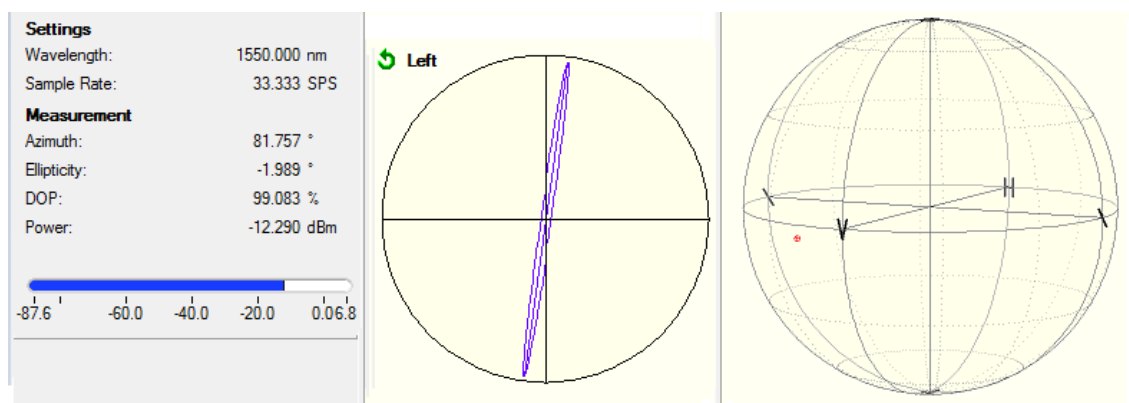
Obr. B.5: Stav polarizace v bodě 2 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2.



Obr. B.6: Stav polarizace v bodě 3 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2.

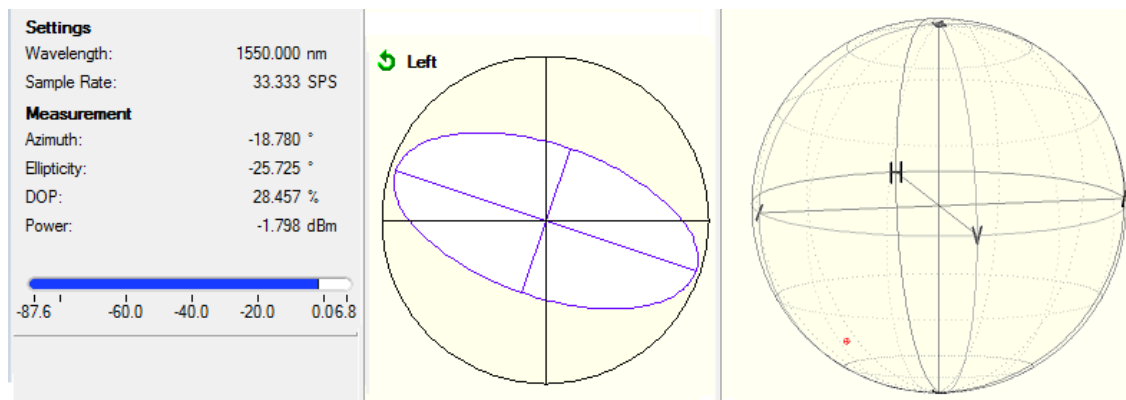


Obr. B.7: Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2.

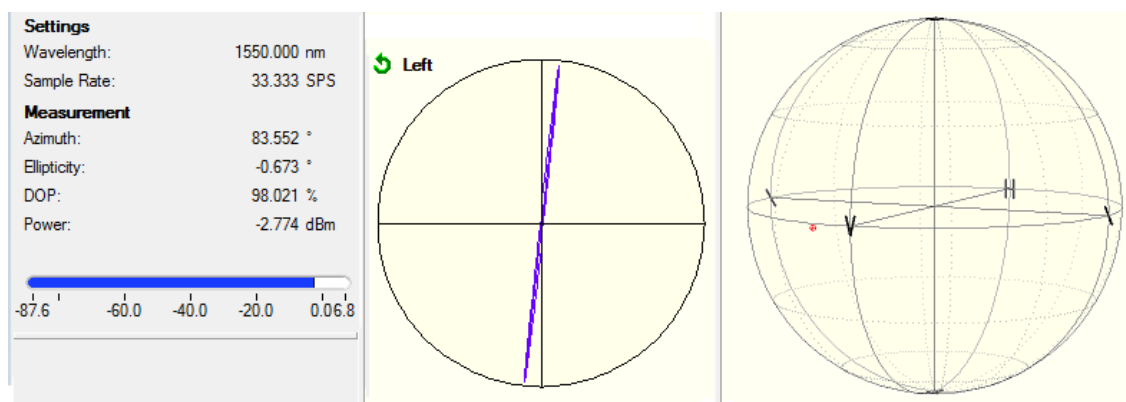


Obr. B.8: Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2.

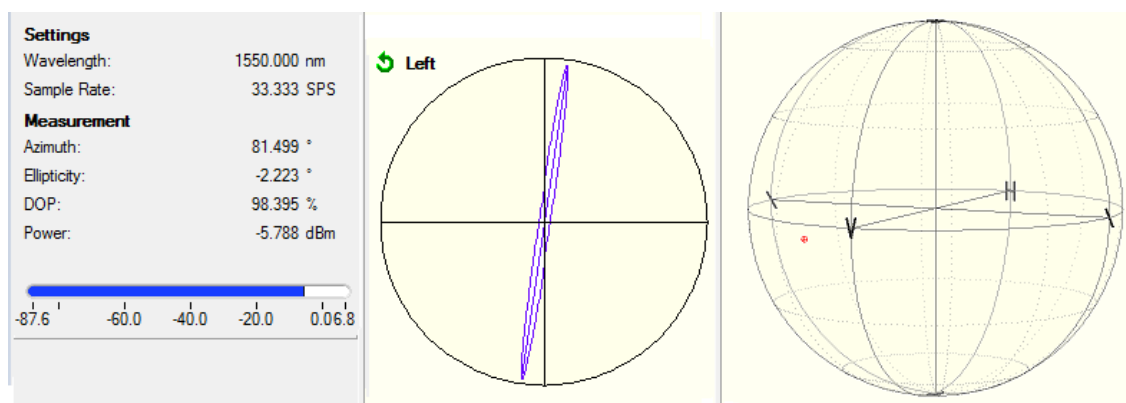
B.3 Stavy polarizace pro LD připojenou na TX1 a s vloženým SM vláknem



Obr. B.9: Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1 se zapojeným SM vláknem.

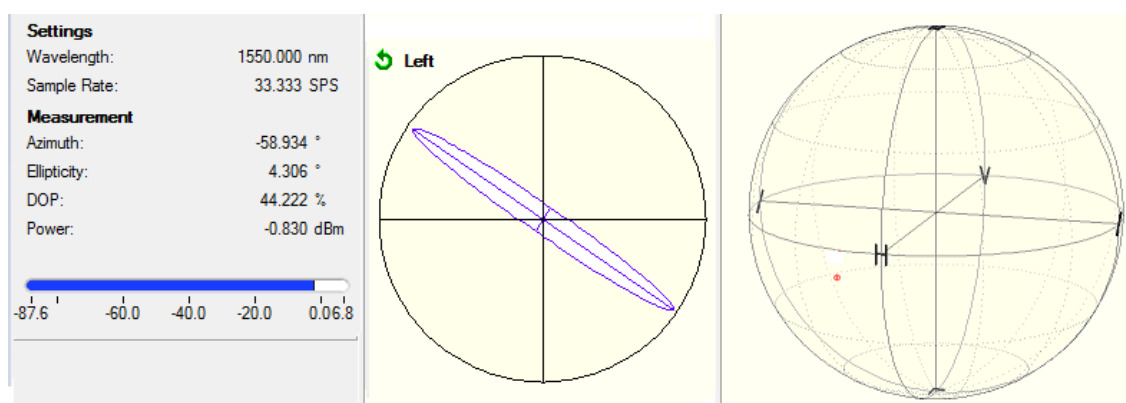


Obr. B.10: Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1 se zapojeným SM vláknem.

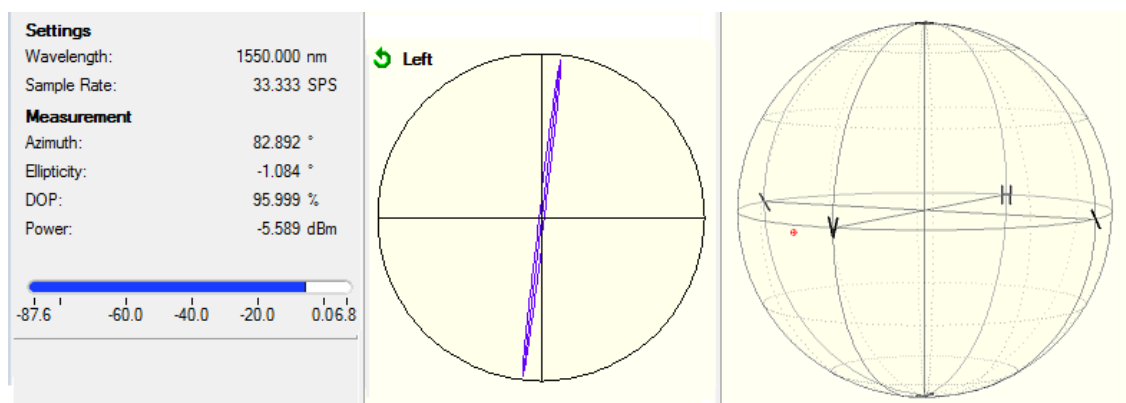


Obr. B.11: Stav polarizace v bodě 6 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX1 se zapojeným SM vláknem.

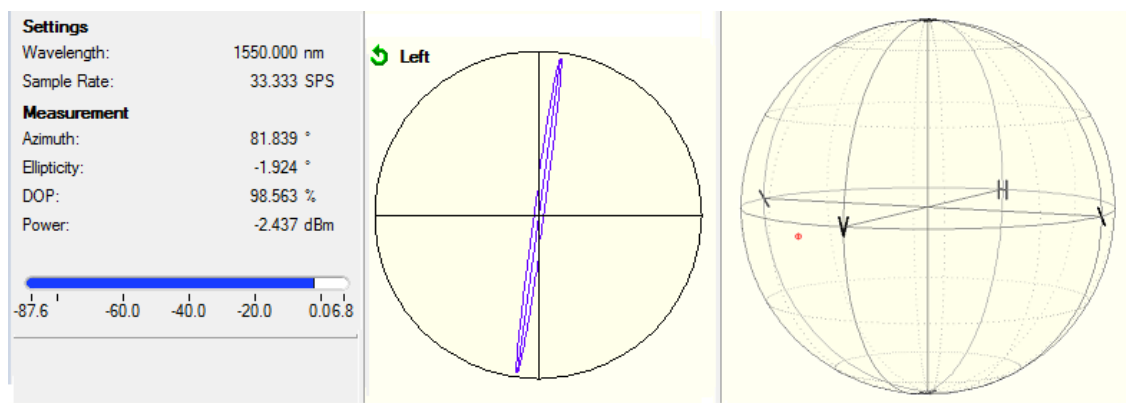
B.4 Stav polarizace pro LD připojenou na TX2 a s vloženým SM vláknem



Obr. B.12: Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2 se zapojeným SM vláknem.

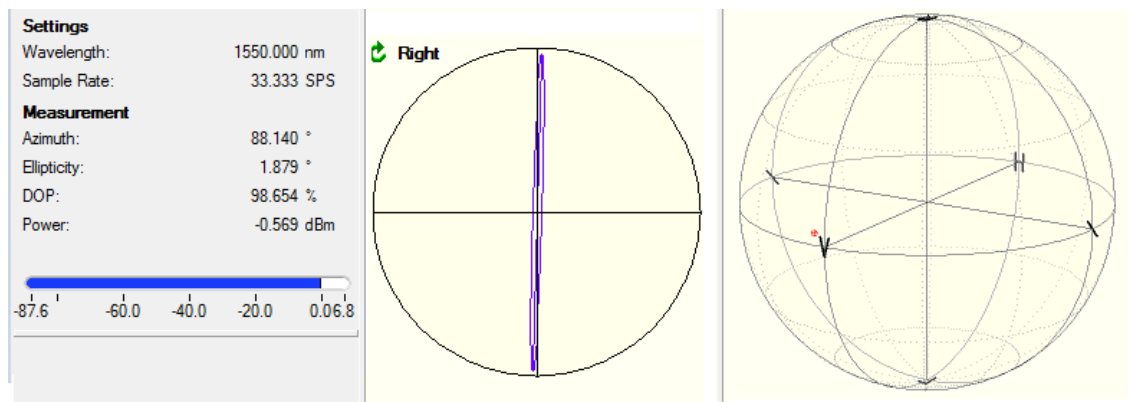


Obr. B.13: Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2 se zapojeným SM vláknem.

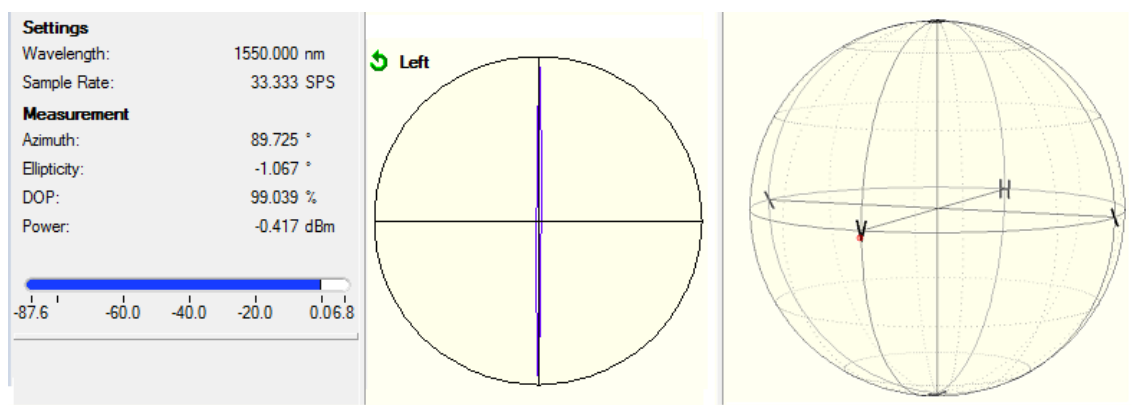


Obr. B.14: Stav polarizace v bodě 6 zobrazen na Poincarého kouli u LD jako TX2 se zapojeným SM vláknem.

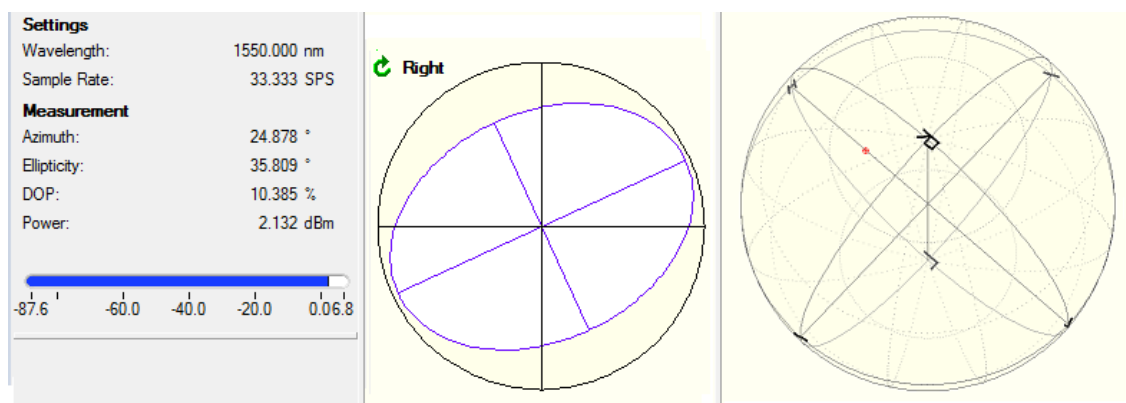
B.5 Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory



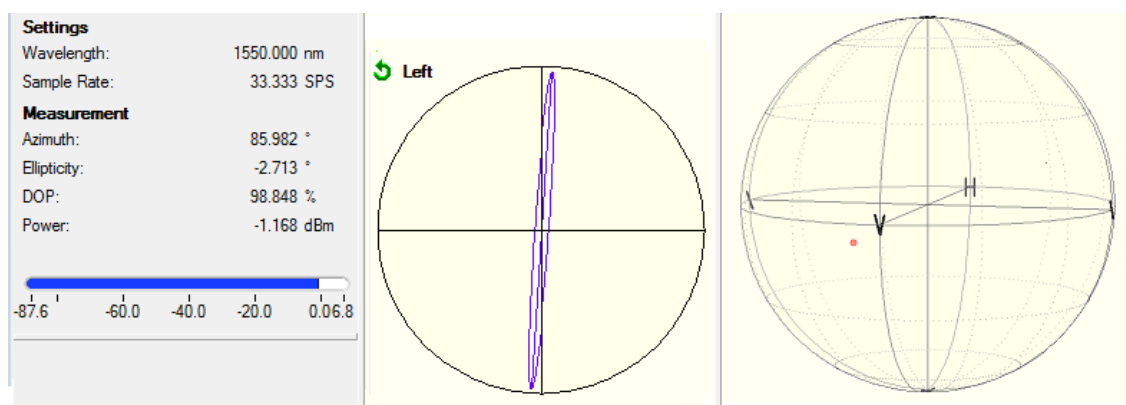
Obr. B.15: Stav polarizace v bodě 1 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.



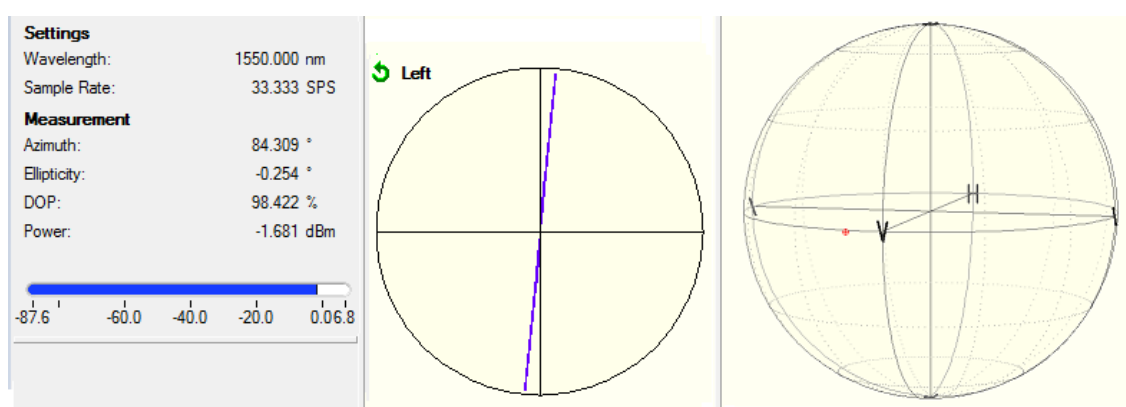
Obr. B.16: Stav polarizace v bodě 2 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.



Obr. B.17: Stav polarizace v bodě 3 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.

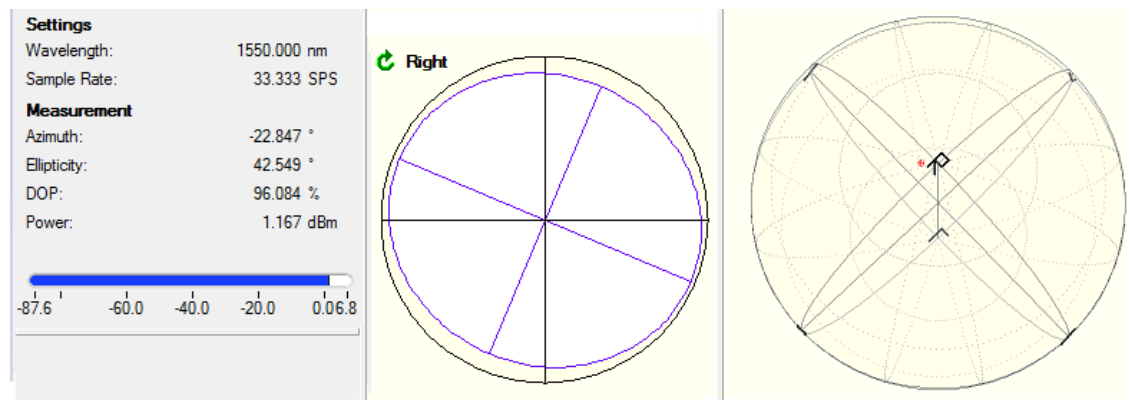


Obr. B.18: Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.

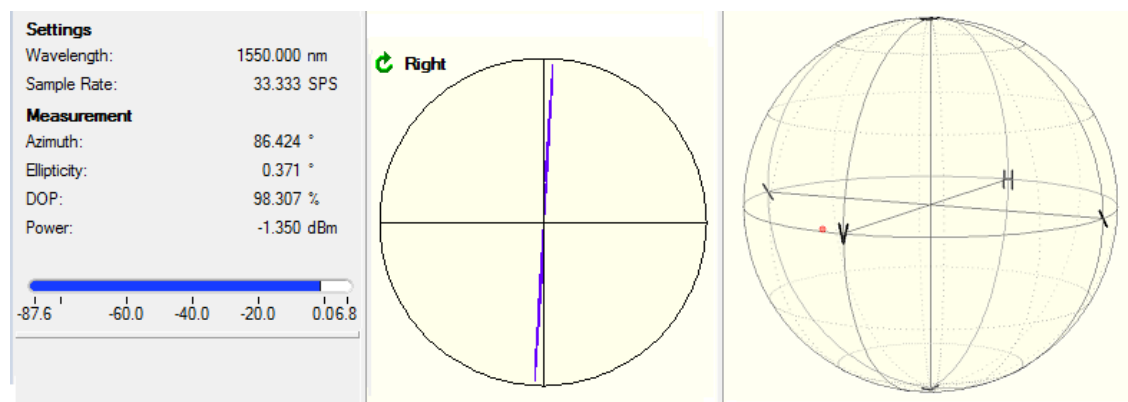


Obr. B.19: Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory.

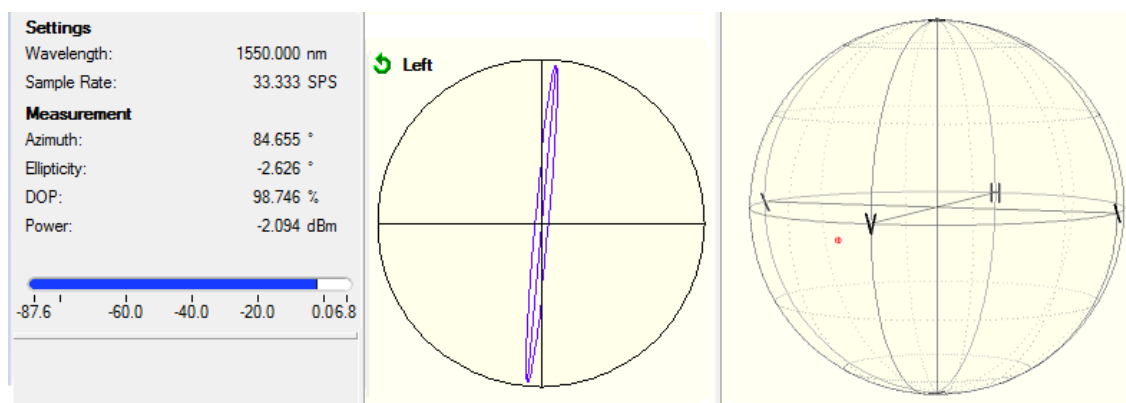
B.6 Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem



Obr. B.20: Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem.

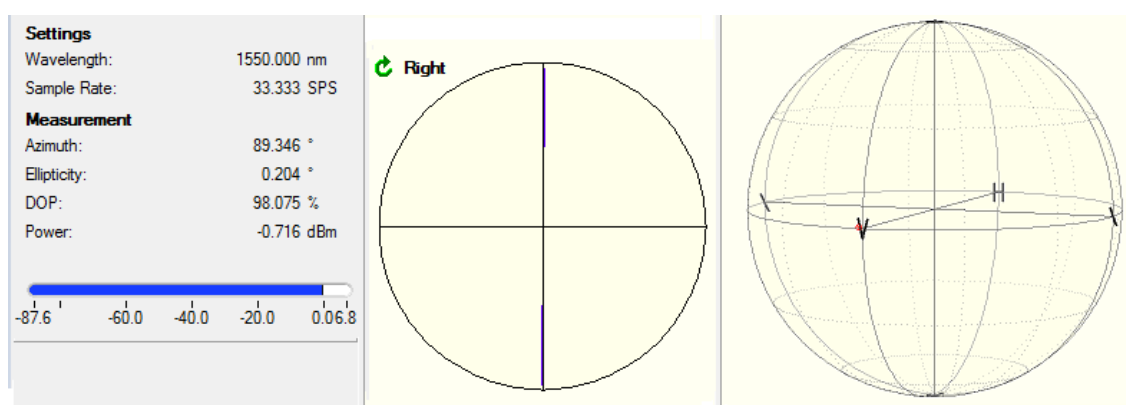


Obr. B.21: Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem.

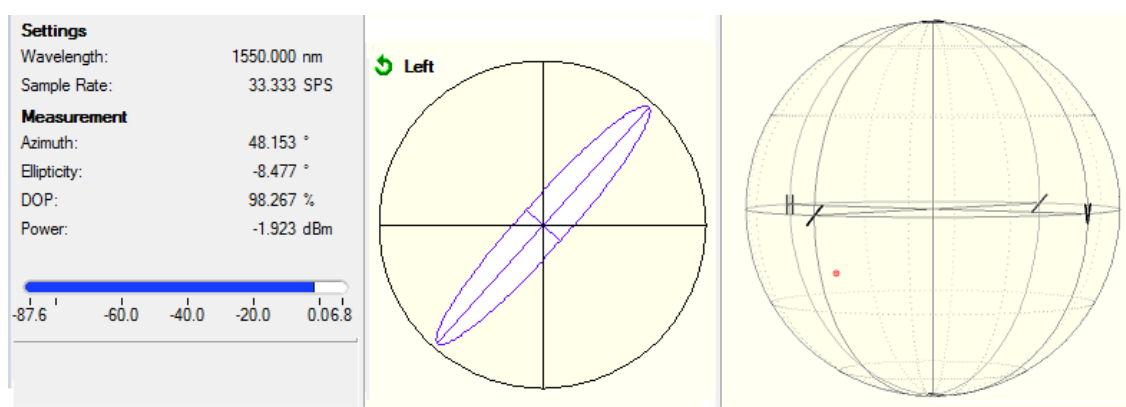


Obr. B.22: Stav polarizace v bodě 6 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory a vloženým SM vláknem.

B.7 Změna Stavů polarizace v SM vlákně

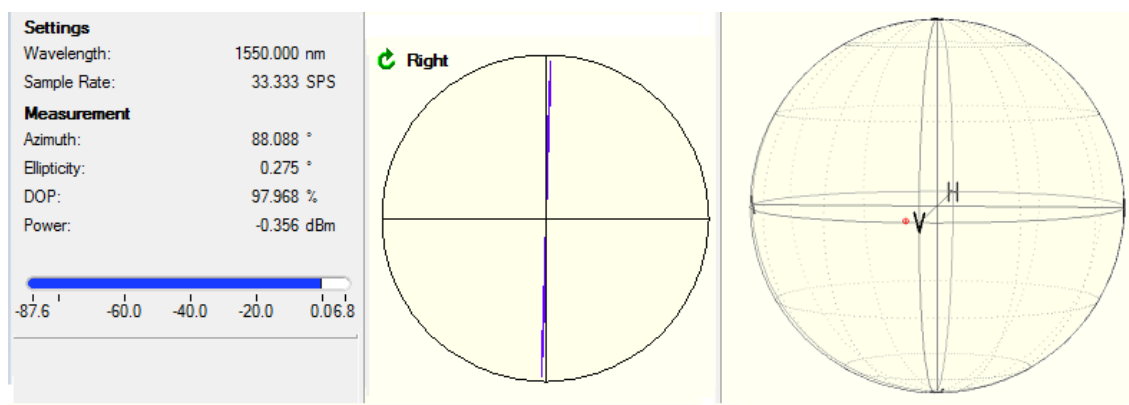


Obr. B.23: Stav polarizace před SM vláknem zobrazen na Poincarého kouli.

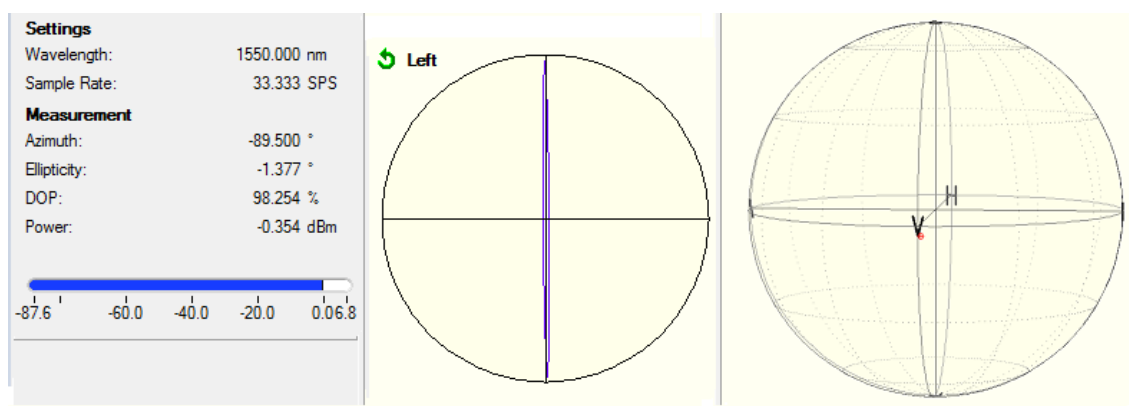


Obr. B.24: Stav polarizace za SM vláknem (1 m) zobrazen na Poincarého kouli.

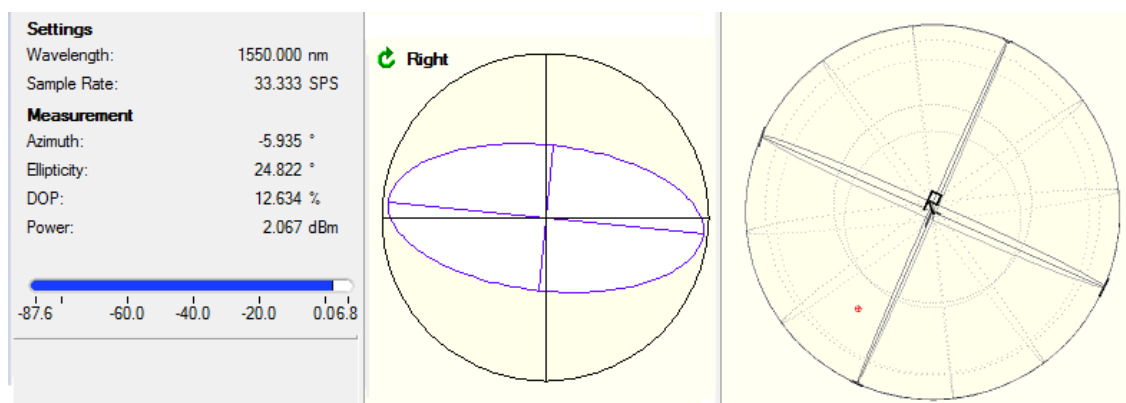
B.8 Stavy polarizace pro zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem



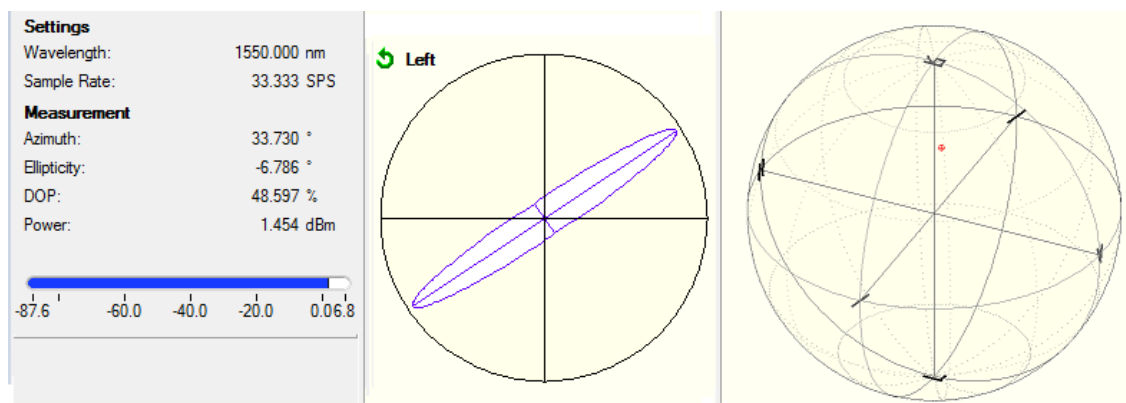
Obr. B.25: Stav polarizace v bodě 1 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.



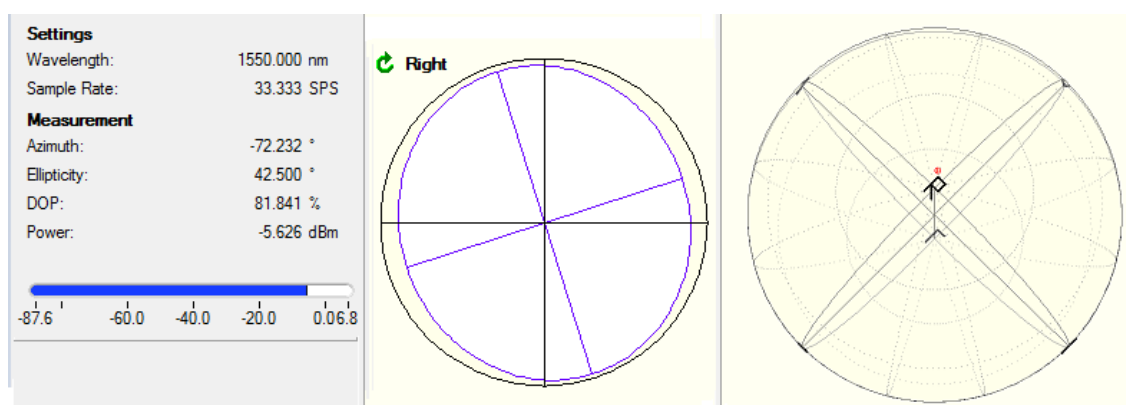
Obr. B.26: Stav polarizace v bodě 2 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.



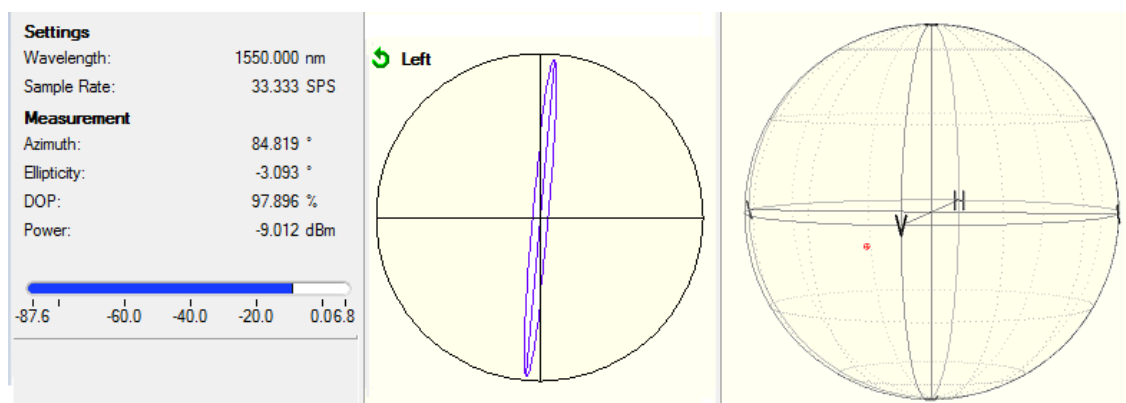
Obr. B.27: Stav polarizace v bodě 3 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.



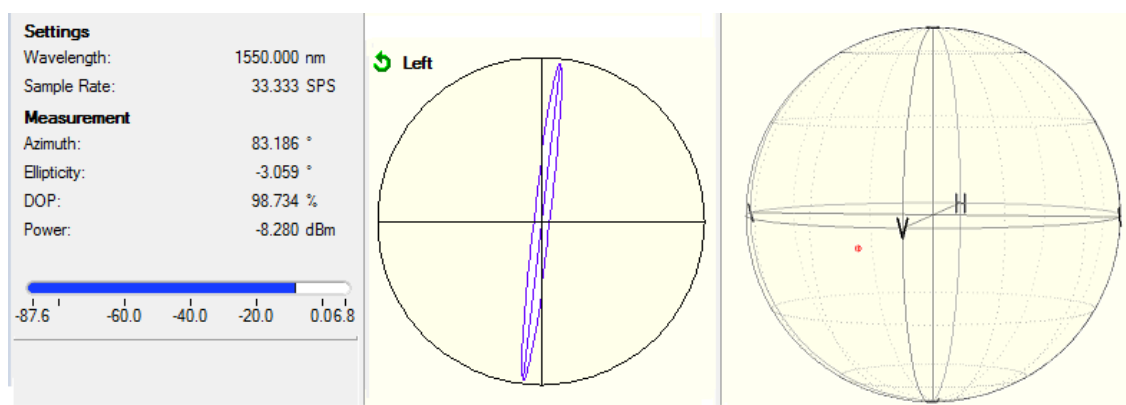
Obr. B.28: Stav polarizace v bodě 4 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.



Obr. B.29: Stav polarizace v bodě 5 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.

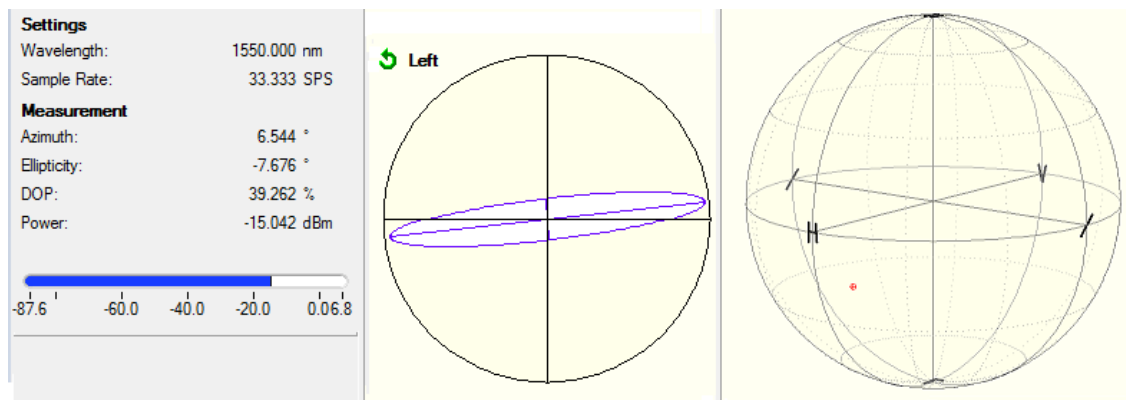


Obr. B.30: Stav polarizace v bodě 6 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.

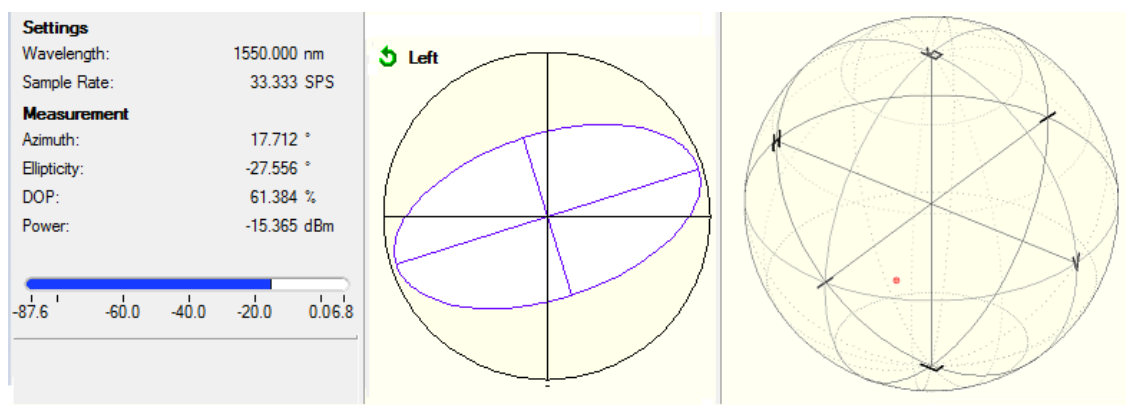


Obr. B.31: Stav polarizace v bodě 7 zobrazen na Poincarého kouli u zapojení s média konvertory, vloženým SM vláknem a polarizačním kontrolérem.

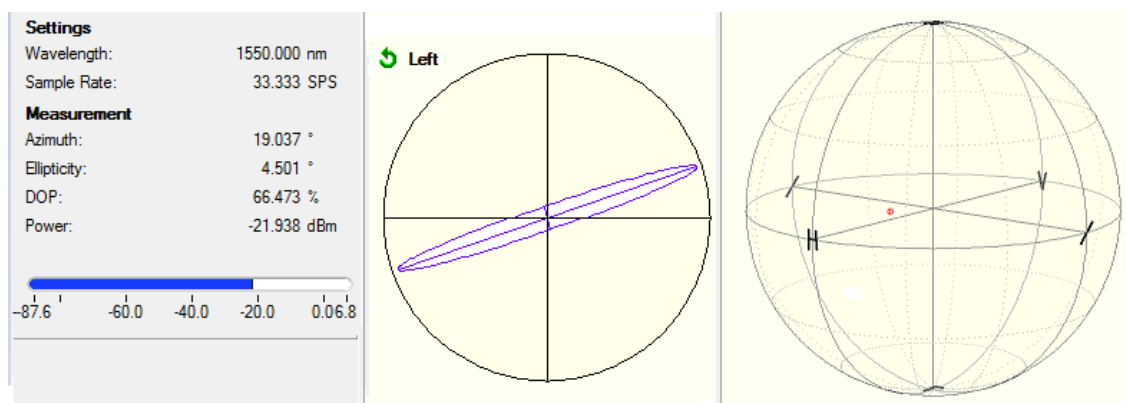
B.9 Stav polarizace za SM vláknem u funkčního pracoviště



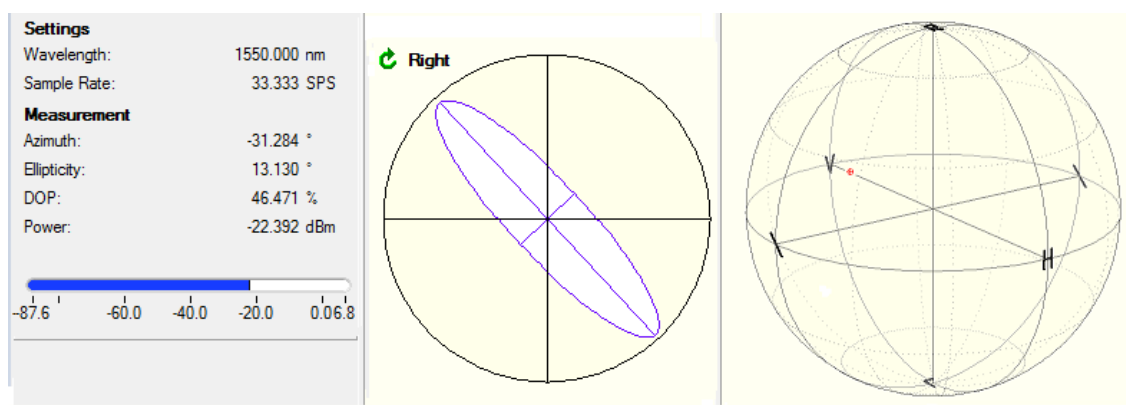
Obr. B.32: Stav polarizace za SM vláknem (1 m) zobrazen na Poincarého kouli u funkčního pracoviště.



Obr. B.33: Stav polarizace za SM vláknem (10 m) zobrazen na Poincarého kouli u funkčního pracoviště.



Obr. B.34: Stav polarizace za SM vláknem (2000 m) zobrazen na Poincarého kouli u funkčního pracoviště.



Obr. B.35: Stav polarizace 2 za SM vláknem (2000 m) zobrazen na Poincarého kouli u funkčního pracoviště.

C PARAMETRY POUŽITÝCH KOMPONENTŮ

C.1 Laserová dioda LPS-PM1550-FC

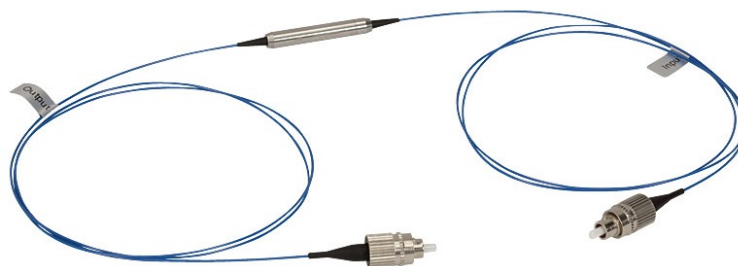


Obr. C.1: LPS-PM1550-FC

Tab. C.1: Parametry pro Laserovou diodu LPS-PM1550-FC (katalog. listy Thorlabs [14]).

LD reverzní napětí (Max)	2 V		
PD reverzní napětí (Max)	20 V		
Optický výstupní výkon	1,2 mW (min)	1,5 mW (typ)	1,8 mW (max)
Provozní teplota	0 - 50 °C		
Pin kód	5D		
Laserová dioda	ML925B45F		
Vlákno	PM1550-HP		
Konektor	FC/PC		
	Min	Typ	Max
Vlnová délka	1520 nm	1550 nm	1580 nm
Prahový proud*	3 mA	10 mA	20 mA
Sklonová účinnost*	0,15 mW/mA	0,25 mW/mA	0,5 mW/mA
Provozní proud $P_0 = 1,5 \text{ mW}^*$	10 mA	30 mA	50 mA
Provozní napětí $P_0 = 1,5 \text{ mW}^*$	-	1,1 V	1,5 V
* Teplota 25 °C			

C.2 Lineární polarizátor ILP1550PM-FC



Obr. C.2: ILP1550PM-FC

Tab. C.2: Parametry pro lineární polarizátor ILP1550PM-FC (katalog. listy Thorlabs [14]).

Vlnová délka	1550 nm	
Šířka pásma	± 50 nm	
Vložený útlum	0,60 dB (typ)	$\leq 0,80$ dB (max)
Extinction Ration	28 dB (typ)	≥ 26 dB (max)
Return Loss	≥ 45 dB	
Power Handling	≤ 300 mW	
Typ vlákna	Fujikura SM15-PS-U25D	
Délka pigtail	0,8 m + 0,075 / -0.0 m	
Konektor	FC/PC	
Velikost polarizátoru	$\varnothing 5,5$ mm x 35 mm	
Provozní teplota	-5 - 70 °C	

C.3 Polarimetr PAX5710IR3



Obr. C.3: PAX5710IR3

Tab. C.3: Parametry pro polarimetr PAX5710IR3 (katalog. listy Thorlabs [14]).

Rozsah příkonu	-60 - 10 dBm
Přesnost orientačního úhlu	0,2°
Přesnost eliptického úhlu	0,2°
Přesnost normovaných Stokesových parametrů (s1, s2, s3)	< 0,005
Přesnost stupně polarizace	± 0,5 %
Vlnová délka	1350 - 1700 nm
Max. rychlost měření	333 vzorků/s
konektor vstupu	FC/PC
Provozní teplota	5 - 35 °C

C.4 Média konvertor TP-LINK MC220L



Obr. C.4: TP-LINK MC220L

Tab. C.4: Parametry média konvertoru TP-LINK MC220L (katalog. listy tp-link [22]).

Standardy a protokoly:	IEEE 802.3ab IEEE 802.3z IEEE 802.3x
Základní funkce	Ovládání full-duplex toku (IEEE 802.3x) Prodlužuje dosah optického vedení až na 0,5 km s optickým kabelem 50/125 μm
Porty	1 gigabitový port SFP 1 port 100M RJ45 (Auto MDI/MDIX)
1000BASE-T	Kabel UTP kat. 5, 5e (max. 100 m) EIA/TIA-568 100 STP (max. 100m)
1000BASE-FX	Mnohovidová/jednovidová optická vlákna
LED indikátory	PWR, LINK, RX
Bezpečnost a emise	FCC, CE
Provozní teplota	0 - 40 °C
Provozní vlhkost	10 - 90 % nekondenzující
Nabíjení	Externí napájecí adaptér

C.5 SFP modul TP-LINK TL-SM321

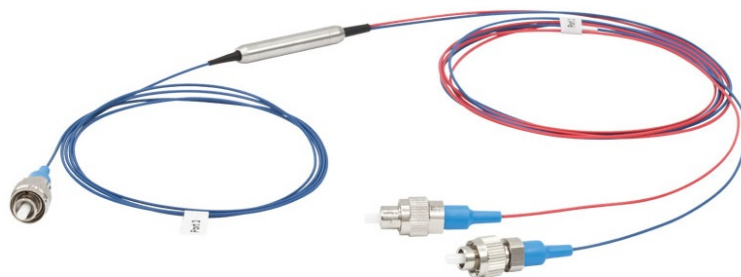


Obr. C.5: TP-LINK TL-SM321

Tab. C.5: Parametry SFP modulu TP-LINK TL-SM321 (katalog. listy tp-link [22]).

Standardy a protokoly:	IEEE 802.3ab IEEE 802.3z
Přenosová rychlost	1,25 Gbps - 1000Base-BX
Vlnová délka TL-SM321A / TL-SM321B	TX: 1550 nm RX: 1310 nm / TX: 1310 nm RX: 1550 nm
Max. délka spoje	10 km
Optický kabel	9/125
Konektor	LC
Provozní teplota	0 - 70 °C
Nabíjení	3,3 V ze switchu nebo média konvertoru

C.6 Polarizační PM splitter/combiner PBC1550PM-FC



Obr. C.6: PBC1550PM-FC

Tab. C.6: Parametry polarizačního PM splitter/combiner PBC1550PM-FC (katalog. listy Thorlabs [14]).

Vlnová délka	1550 nm
Šířka pásma	± 40 nm
Vložený útlum	$\leq 1,2$ dB
Extinction Ratio (splitter)	≥ 20 dB
Délka pigtail	1 m + 0,075 / -0,0 m
Typ vlákna	SM15-PS-U25D
Konektory	FC/PC
Velikost splitteru	$\varnothing 5,5$ mm x 35 mm
Provozní teplota	-5 - 70 °C

C.7 Patchcord optický SM LC-FC



Obr. C.7: OPA-9-FC/LC-1D-AMP

Tab. C.7: Parametry propojovacího kabelu OPA-9-FC/LC-1D-AMP (katalog. listy Cozlink [23]).

Vlnová délka	980-1550 nm
Typ vlákna	OS1 SM G652.D 9/125 μm
Max. útlum	0,3 dB
Min. Return Loos	-50 dB
Délka	1 m
Konektor	Duplex LC/UPC-FC/UPC
Provedení ochrany vlákna	LSOH 2x 2,5 mm žlutý

C.8 Jednovidový optický kabel Cozlink



Obr. C.8: CPP-FC-P-FC-P-SS-GD-PVC

Tab. C.8: Parametry jednovidového optického kabelu CPP-FC-P-FC-P-SS-GD-PVC (katalog. listy Cozlink [23]).

Délka	1 m / 10 m	2000 m
Vlnová délka	980-1550 nm	
Typ vlákna	OS1 SM G652.D 9/125 μm	
Max. útlum	0,3 dB	
Min. Return Loos	-50 dB	
Konektor	FC/UPC-FC/UPC	E2000/APC-E2000/APC
Provedení ochrany vlákna	LSOH 2,5 mm žlutý	-

C.9 Patchcord optický SM E2000-FC



Obr. C.9: E2AFC-9-S20-YW-2M0

Tab. C.9: Parametry jednovláknového optického kabelu E2AFC-9-S20-YW-2M0 (katalog. listy Cozlink [23]).

Vlnová délka	980-1550 nm
Typ vlákna	OS1 SM G652.D 9/125 μm
Max. útlum	0,3 dB
Min. Return Loos	-50 dB
Délka	2 m
Konektor	E2000/APC-FC/PC
Provedení ochrany vlákna	LSOH 2,5 mm žlutý

C.10 Polarizační kontrolér FPC561

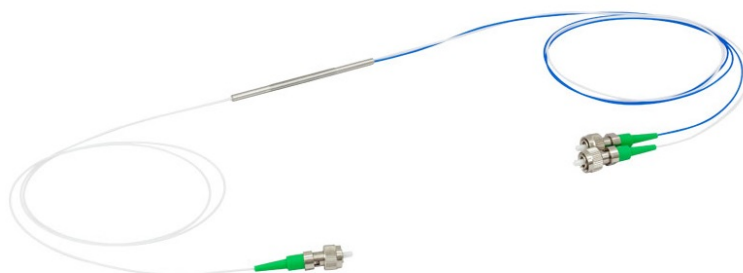


Obr. C.10: FPC561

Tab. C.10: Parametry polarizačního kontroléru FPC561 (katalog. listy Thorlabs [14]).

Počet fázových destiček	3
Průměr smyčky	56 mm
Úhel natočení pádel	$\pm 117,5^\circ$
Vlnová délka	1260-1625 nm
Typ vlákna	SMF-28-J9
Numerická Apertura	0,14 dB
Ztráta ohyby	$\leq 0,1$ dB
Délka	2 m
Konektor	FC/PC-FC/PC

C.11 Dělič optického výkonu PMC1550P-90B-FC



Obr. C.11: PMC1550-90B-FC

Tab. C.11: Parametry optického děliče výkonu PMC1550P-90B-FC (katalog. listy Thorlabs [14]).

Vlnová délka	1550 nm
Šířka pásma	± 15 nm
Rozdělovací poměr	90/10
Vložený útlum	$\leq 0,95/11,3$ dB
Excess loss (typ)	$\leq 0,3$ dB
Směrovost	≥ 55 dB
Délka pigtail	0,8 m + 0,075 / -0,0 m
Konektor	FC/PC
Velikost splitteru	$\varnothing 3$ mm x 70 mm
Provozní teplota	-20 - 70 °C

C.12 Analyzátor výkonnosti komunikace HP 37717C

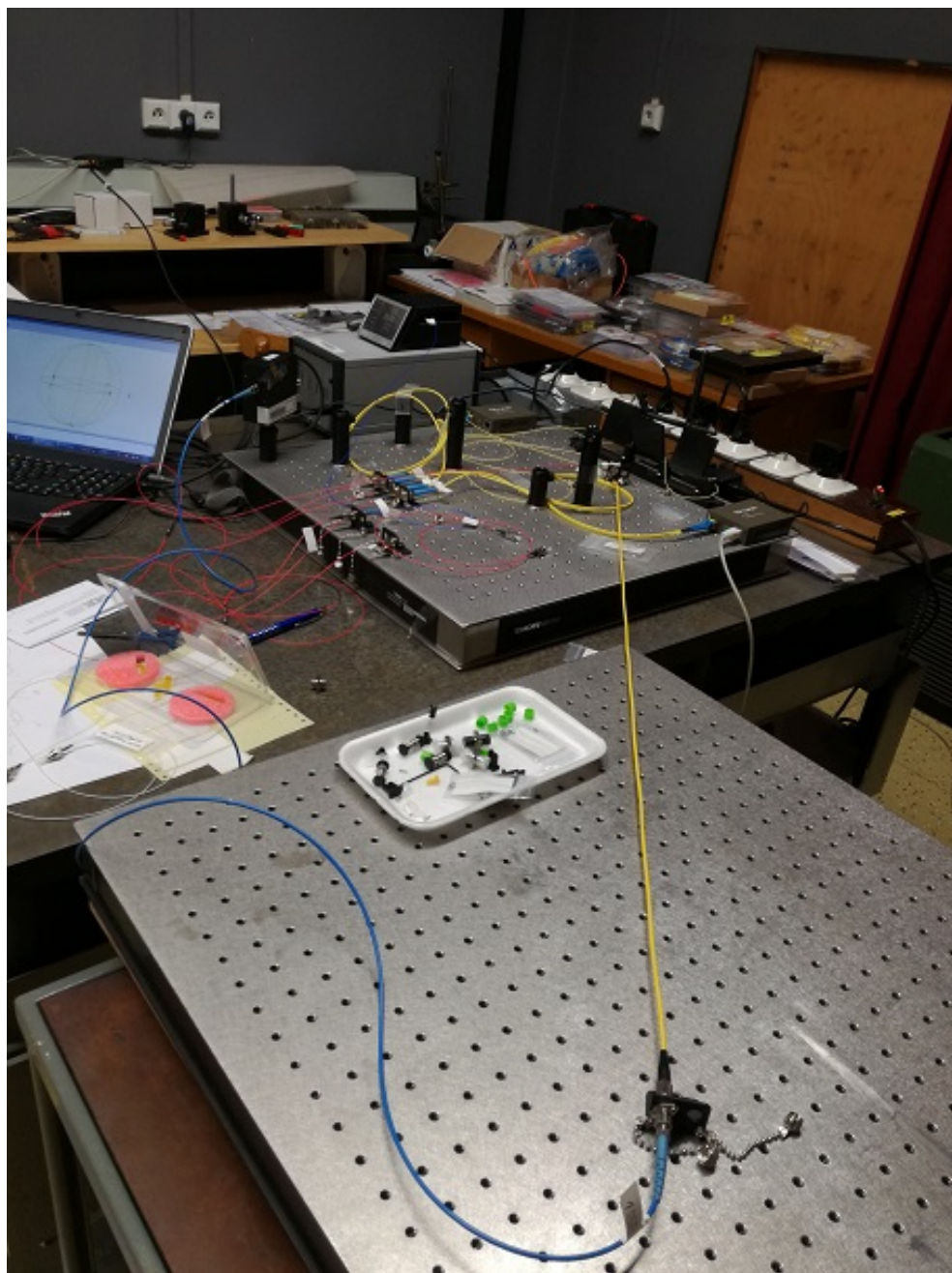


Obr. C.12: Hewlett Packard 37717C

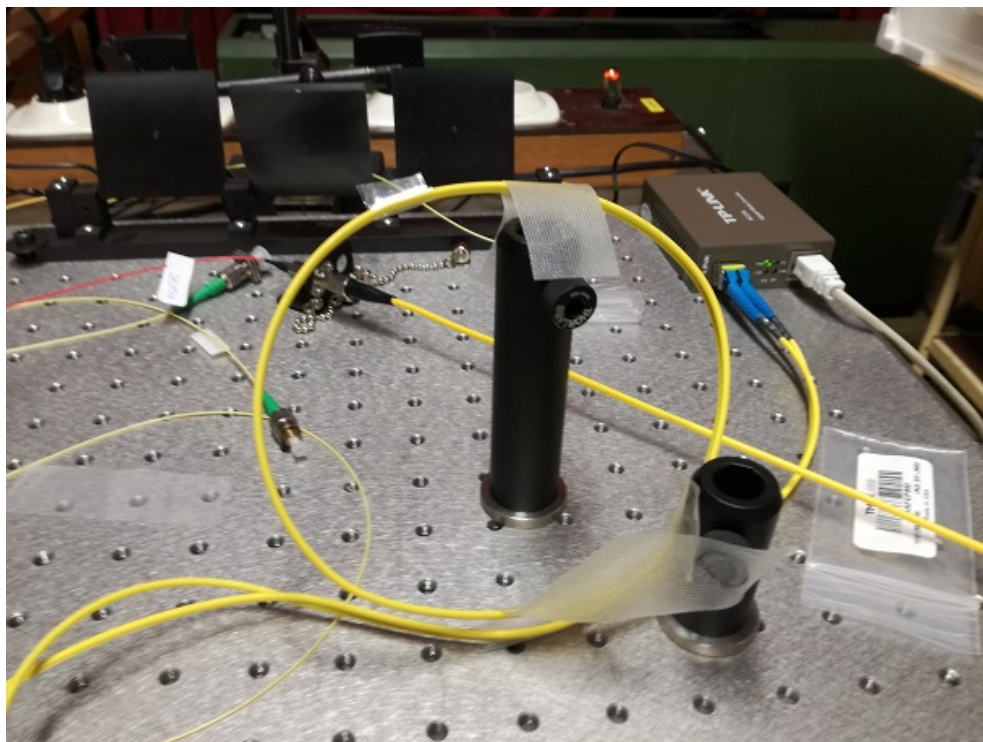
Tab. C.12: Parametry Analyzátoru výkonnosti komunikace HP 37717C (katalog. listy Keysight technologies [24]).

Funkce	<ul style="list-style-type: none"> • Testování vrstevných služeb ATM s/bez native LAN připojení <ul style="list-style-type: none"> • Generování a měření ATM buněk • Elektrické rozhraní SONET / SDH • Optické rozhraní SONET / SDH (1310 a 1550 nm) <ul style="list-style-type: none"> • Binární rozhraní SONET / SDH • PDH a SDH jitter /wander Tx a Rx • Testování DSn (strukturované DS1, DS3, E1, E3) <ul style="list-style-type: none"> • Více výstupů PDH • Testování PDH (704 kb/s až 140 Mb/s) • Binární rozhraní PDH s externím vstupem <ul style="list-style-type: none"> • Tiskárny / vzdálené rozhraní • Grafická tiskárna
Váha	18 kg
Rozměry	340 x 420 x 190mm (š x h x v)
Napájení	230 V

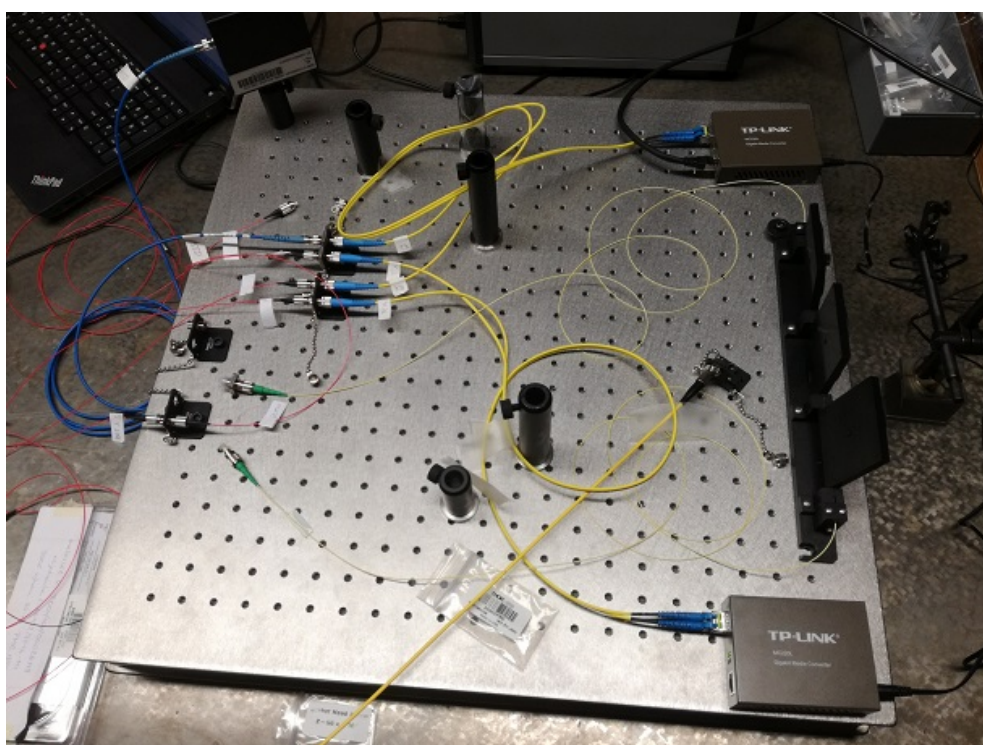
D FOTOGRAFIE PRACOVISTĚ



Obr. D.1: Fotografie zapojení celého pracoviště.



Obr. D.2: Fotografie zobrazující nastavení polarizace v SM patchcord kabelu.



Obr. D.3: Detailní fotografie zapojení pracoviště.



Obr. D.4: Fotografie pracoviště při měření chybovosti.

E OBSAH DVD

Elektronická verze diplomové práce - DP_Mafka_Martin.pdf

Součástí je také zabalený soubor DP_Mafka_Martin.rar, v kterém jsou sobory pro \LaTeX , obrázky a fotografie pracoviště.